



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.731.11 (234.851)

DOI: 10.19110/geov.2026.3.2

Преобразования детритовых хромшпинелидов при метаморфизме нижнепалеозойских пород алькесвожской свиты (Приполярный Урал)

С. А. Онищенко, Л. И. Ефанова, С. К. Кузнецов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
mine222@ya.ru

Детритовые хромшпинелиды в терригенных породах алькесвожской свиты при метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации вступают во взаимодействие с породной матрицей. В результате происходит замещение хромшпинелида Cr-содержащим мусковитом (фукситом) или магнетитом. Реликтовая часть хромшпинелидов в результате обмена компонентами с окружающей средой замещается вторичными хромшпинелидами, в составе которых отсутствует Mg, но фиксируются значительные содержания Zn. Состав всех зерен хромшпинелидов является вторичным, но процесс изменений, вызванный метаморфизмом осадочных пород, хорошо прослеживается только в некоторых из них. Содержания ZnO в хромшпинелидах изменяются как от зерна к зерну, так и в пределах одного зерна. Минимальное зафиксированное нами содержание ZnO в детритовом хромшпинелиде составляет 1.3 мас. %, максимальное – 17.5 мас. %. Итогом преобразований хромшпинелидов является консервация их реликтов в кристаллах магнетита либо полное исчезновение. О прежнем присутствии детритовых хромшпинелидов в породе свидетельствует только наличие Cr в метаморфических минералах (слюде, хлорите и гематите), а также синтез идиоморфных кристалликов Zn-содержащего (14.4–18.1 мас. % ZnO) хромшпинелида в фукситовой матрице.

Ключевые слова: *детритовый хромшпинелид, Zn-содержащий хромшпинелид, Cr-содержащий мусковит (фуксит), метаморфизм*

Transformations of detrital chrome spinels during metamorphism of Lower Paleozoic rocks of the Alkesvozh suite (Subpolar Urals)

S. A. Onishchenko, L. I. Efanova, S. K. Kuznetsov

Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

Detrital chrome spinels in terrigenous rocks of the Alkesvozh suite interact with the rock matrix during metamorphism under greenschist facies conditions. This results in the replacement of chrome spinels by Cr-bearing muscovite (fuchsite) or magnetite. The relict portion of the chrome spinels, as a result of component exchange with the environment, is replaced by secondary chrome spinels, which lack Mg but contain significant Zn contents. The composition of all chrome spinel grains is secondary, but the process of change caused by metamorphism of sedimentary rocks is clearly visible only in some of them. The ZnO content of detrital chrome spinels varies both from grain to grain and within a single grain. The minimum ZnO content recorded by us in chrome spinels is 1.3 wt. %, and the maximum is 17.5 wt. %. The final result of the transformation of chrome spinels is the conservation of their relics in magnetite crystals, or their complete disappearance. The former presence of detrital chrome spinelides in the rock is evidenced only by the presence of Cr in metamorphic minerals (mica, chlorite, and hematite), as well as the synthesis of idiomorphic crystals of Zn-containing (14.4–18.1 wt. % ZnO) chromium spinelide in a fuchsite matrix.

Keywords: *detrital chrome spinelide, Zn-containing chrome spinelide, Cr-containing muscovite (fuchsite), metamorphism*

Введение

Хромшпинелиды принадлежат к группе оксишпинели, подгруппе шпинели (шпинелидам) с общей формулой $A^{2+}B^{3+}_2O_4$. Двухвалентные катионы в подгруппе обычно представлены Fe^{2+} , Mg, Mn^{2+} , Zn, трехвалентные — Al, Cr, Fe^{3+} , V^{3+} , Mn^{3+} . Между конечными

членами подгруппы наблюдаются многочисленные серии изоморфных замещений, проявляющиеся как между двухвалентными катионами, так и трехвалентными. Состав хромшпинелидов — обычных акцессорных минералов мафит-ультрамафитовых пород — описывается в основном изоморфной смесью конечных чле-

Для цитирования: Онищенко С. А., Ефанова Л. И., Кузнецов С. К. Преобразования детритовых хромшпинелидов при метаморфизме нижнепалеозойских пород алькесвожской свиты (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2026. 3(375). С. 15–32. DOI: 10.19110/geov.2026.3.2

For citation: Onishchenko S. A., Efanova L. I., Kuznetsov S. K. Transformations of detrital chrome spinels during metamorphism of Lower Paleozoic rocks of the Alkesvozh suite (Subpolar Urals). Vestnik of Geosciences, 2026, 3(375), pp. 15–32, doi: 10.19110/geov.2026.3.2



нов: магнезиохромит – хромит – герцинит – шпинель ($MgCr_2O_4-FeCr_2O_4-FeAl_2O_4-MgAl_2O_4$).

Магматические хромшпинелиды при постмагматических и метаморфических процессах в той или иной степени замещаются вторичными хромшпинелидами и магнетитом. Довольно часто замещение происходит с образованием своеобразной зональности, в которой неизменное или малоизменное ядро окружено каймами вторичных хромшпинелидов, среди которых преобладают разности, лишенные первичного магния, нередко обогащенные трехвалентным железом; внешняя кайма обычно сложена магнетитом. Нередко процесс замещения сопровождается повышением концентрации Zn и Mn как в каймах, так и в ядрах до содержаний, намного превышающих содержания этих элементов в первичных магматогенных шпинелях. Обычный уровень содержания ZnO в хромшпинелидах базит-гипербазитовых пород, не затронутых постмагматическими изменениями, невысокий. Предельный уровень концентрации ZnO в шпинелях неизменных магматических пород большинством исследователей оценивается в 1 мас. % (Wylie et al., 1987; Макеев, 1992; Bjerg et al., 1993; Liipo et al., 1995; Barnes, 2000; Силаев и др., 2010; Svetov et al., 2019; Резницкий и др., 2023 и др.).

Zn-Cr-содержащие шпинелиды распространены в метасоматитах по базит-ультрабазитам (лиственитах, родингитах, скарноподобных образованиях, жадеититах, нефритоидах, актинолититах) и в сопутствующих гидротермально-метасоматических сульфидных рудах (Von Knorring et al., 1986; Wylie et al., 1987; Gahlan, Arai, 2007; Fanlo et al., 2015; Мурзин и др., 2017; Онищенко, Соболева, 2021). Собственно цинкохромит $ZnCr_2O_4$ был открыт в Cr-V-содержащих слюдястых метасоматитах уран-ванадиевого месторождения Средняя Падма в Южной Карелии. Цинкохромит образует мелкие (2–10, изредка 40–50 мкм) идиоморфные кристаллы, содержит 37.05 мас. % ZnO и 53.30 мас. % Cr_2O_3 (Нестеров, Румянцева, 1987). Цинкохромит отмечен на Березовском золоторудном месторождении на Урале (Спиридонов, 2014), Zn-Cr-содержащие шпинелиды ряда цинкохромита – ганита присутствуют на колчеданном месторождении Оутокумпу в Финляндии (Treloar et al., 1987).

В метаморфизованных осадочных горных породах распространены детритовые Zn-содержащие хромшпинелиды. Обогащение цинком могло быть связано с преобразованием зерен магматогенных хромшпинелидов при метаморфизме пород, но возможно также поступление хромшпинелидов в осадочный бассейн уже в обогащенном цинком виде.

Zn-содержащие хромшпинелиды изучены в метапелитах округа Сайксвилл (штат Мэриленд, США). Наиболее высокие содержания ZnO (до 19.05 мас. %) — в центральных частях зерен (Wylie et al., 1987). В нижнепалеозойских Cr-содержащих кварцитах и биотитовых сланцах на северо-западе Нельсона (Новая Зеландия) Zn-содержащие хромшпинелиды (до 13.7 мас. % ZnO) ассоциируют с фукситом, уваровитом и Cr-содержащим рутилом (Challis et al., 1995).

В обогащенных тяжелыми минералами слоях кварцитов в докембрийских золотоносных конгломератах месторождения Тарква в Гане зерна хромшпинелидов размером до 200 мкм заключены в кристаллах магне-

тита. Хромшпинелиды содержат в среднем 13.3 (до 19.4) мас. % ZnO при отсутствии магния (Weiser, Hirdes, 1997). В архейских (гадейских) кварцитах и метаконгломератах Джек-Хиллз (кратон Йилгарн, Западная Австралия) детритовые хромшпинелиды, тесно ассоциирующие с фукситом, содержат до 13 мас. % ZnO и до 4.4 мас. % MnO (Staddon et al., 2021). В архейских метаконгломератах западной части Индийского щита окатанные глиноземистые хромшпинелиды содержат (мас. %): ZnO — от 7.1 до 15.5, MnO — до 2.55, MgO — до 0.18 (Pal et al., 2022).

Детритовые хромшпинелиды найдены в метапесчаниках Удоканского осадочного бассейна (Забайкалье). Они образуют реликтовые включения в кристаллах магнетита, содержат до 11.6 мас. % ZnO и до 6.3 мас. % MnO при практически полном отсутствии MgO (Новоселов и др., 2024). Детритовые хромшпинелиды присутствуют в полосчатых фукситсодержащих ильменит-гематитовых кварцевых песчаниках в юго-восточной части Восточного Саяна. Хромшпинелиды содержат 12–27 мас. % ZnO при практически полном отсутствии MgO (Киселева и др., 2025).

Zn-содержащие хромшпинелиды на Приполярном и Полярном Урале обнаружены в терригенных породах основания палеозойской части разреза: в метапесчаниках алькесвожской свиты, в гравелитах предположительно саранхапнерской свиты (Павлова, 2011), в конглобрекциях в верховьях реки Малая Кара (Никулова и др., 2014), в песчаниках манитанырдской серии на восточном склоне поднятия Енганепэ (Никулова и др., 2018).

Zn-Mn-содержащие хромшпинелиды в метапесчаниках алькесвожской свиты встречаются в виде мелких зерен (0.15–0.3 мм) с оторочками фуксита. Форма зерен округлая, поверхность корродированная без какой-либо огранки, трещины в минерале выполнены фукситом. Состав минералов (мас. %): ZnO — 5.0–27.4, FeO — 1.4–15.9, MnO — 4.3–11.4, MgO — 0–3.5, Cr_2O_3 — 45.5–62.7, Al_2O_3 — 0.5–15.7, Fe_2O_3 — 0–6.7, TiO_2 — 0–0.13, V_2O_5 — 0–0.4. Зерна с наиболее высокими содержаниями цинка соответствуют цинкохромиту (Юдович и др., 1997; Макеев и др., 1999; Макеев, Макеев, 2005).

Целью исследования является установление закономерностей преобразования детритовых хромшпинелидов при метаморфизме пород алькесвожской свиты.

Геологический очерк

Район находится на западном склоне Приполярного Урала в бассейне р. Кожым. В геологическом отношении он находится в пределах Центрально-Уральского поднятия и приурочен к северной части крупной геологической структуры — Ляпинского антиклинория (рис. 1). Наиболее древние отложения представлены пуйвинской, хобеинской и мороинской свитами, в состав которых входят в основном слюдясто-кварцевые сланцы с линзами мраморов и кварцитов, хлорит-серицит-альбит-кварцевые сланцы, алевросланцы, метаалевролиты. Пуйвинская свита на карте представлена как среднерифейская, но есть основания считать ее верхнерифейской (Пыстин и др. 2022). Локально развита эффузивные породы кислого и основного состава, относящиеся к саблегорской свите позднего рифея — раннего венда. На докембрийских образова-

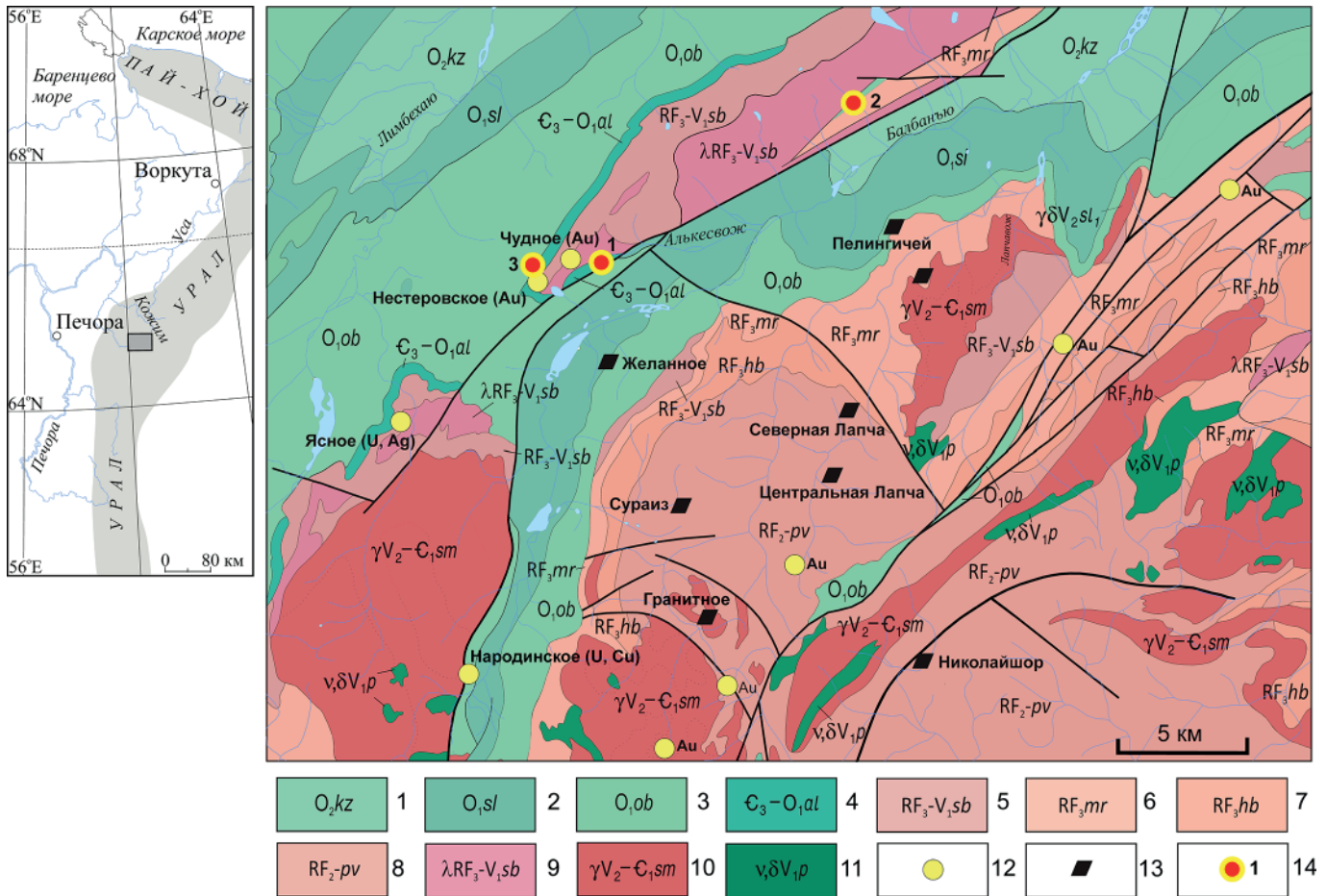


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Приполярного Урала (по: Государственная..., 2013 с изменениями): 1 — кожимская свита: известняки, известковые сланцы и песчаники; 2 — салецкая свита: хлорит-серицит-кварцевые сланцы, песчаники; 3 — обеизская свита: кварцитопесчаники, конгломераты, гравелиты; 4 — алькесвожская свита: гравелиты, песчаники с прослоями сланцев; 5 — саблегорская свита: эффузивы кислого и основного состава; 6 — моринская свита: сланцы хлорит-серицит-альбит-кварцевые, алевросланцы, метаалевролиты; 7 — хобеинская свита: кварциты, конгломераты, сланцы хлорит-серицит-альбит-кварцевые; 8 — пуйвинская свита: слюдисто-кварцевые сланцы с линзами мраморов и прослоями кварцитов; 9 — саблегорские субвулканические риолиты; 10 — граниты сальнеро-маньхамбовского комплекса; 11 — габбро, габбро-долериты, диориты парнукского комплекса; 12 — рудные месторождения и проявления; 13 — хрусталеносные месторождения; 14 — места находок детритовых Zn-Mn-содержащих хромшпинелидов (1 — участок Альбовский, 2 — руч. Быстрый, 3 — проявление Нестеровское)

Fig. 1. Schematic geologic structure of the northern Subpolar Urals, modified from State Geological Map..., 2013: 1 — Kozhim formation: limestones, calcareous shales and sandstones; 2 — Saled formation: chlorite-sericite-quartz schists, sandstones; 3 — Obeiz formation: quartzite sandstones, conglomerates, gravelstones; 4 — Alkesvozh formation: gravelstones, sandstones with schist interbeds; 5 — Sablegorsk formation: felsic and mafic effusive rocks; 6 — Moroya formation: chlorite-sericite-albite-quartz schists, silty shales, metasiltstones; 7 — Khobeyu formation: quartzites, conglomerates, chlorite-sericite-albite-quartz schists; 8 — Puiva formation: mica-quartz schists with marble lenses and quartzite interbeds; 9 — Sablegorsk subvolcanic rhyolites; 10 — granites of the Sal'ner-Mankhambo complex; 11 — gabbro, gabbro-dolerites, and diorites of the Parnuk complex; 12 — ore deposits and ore occurrences; 13 — rock crystal deposits; 14 — locations of finds of detrital Zn-Mn-containing chrome spinels (1 — Albovsky site, 2 — Bystry Creek, 3 — Nesterovskoye occurrence)

як с угловым и стратиграфическим несогласием залегают более молодые отложения. В виде узкой полосы и отдельных выходов прослеживаются кварцевые гравелиты и песчаники алькесвожской свиты позднего кембрия – раннего ордовика. Они сменяются ордовикскими отложениями: кварцитопесчаниками, конгломератами и гравелитами обеизской свиты, хлорит-серицит-кварцевыми сланцами и песчаниками салецкой свиты, известняками и известковистыми сланцами кожимской свиты. Интрузивные образования представлены в основном гранитами поздневендско-раннекембрийского сальнеро-маньхамбовского комплекса, габбро, габбро-долеритами и диоритами пар-

нукского комплекса ранневендского возраста. Все породы претерпели метаморфизм зеленосланцевой фации, при этом породы рифея в южной и юго-восточной части района были, видимо, метаморфизованы неоднократно.

Широко развиты кварцево-жильно-хрусталеносные месторождения, а также золотосульфидные, золотосульфидно-кварцевые, свинцово-цинковые, уран-серебряные, уран-медные, молибденовые и редкоземельные проявления. Наиболее крупными рудными объектами являются Au-Pd-месторождение Чудное и Au-Pd-рудопоявление Нестеровское, тяготеющие к межформационной границе двух крупнейших текто-

нических комплексов: рифей-вендского (доуралиты) и палеозойского (уралиты). В этих объектах присутствует Cr-содержащая минерализация, происхождение которой в риолитах месторождения Чудное пока не находит объяснения.

Отложения алькесвожской свиты, залегающие в основании палеозойского чехла, представлены конгломератами, гравелитами, песчаниками и алевро-сланцами; в породах отмечаются резкие фациальные переходы. В обломочной части пород преобладает кварц, цемент серицит-кварцевый, хлорит-серицит-кварцевый, иногда с пиррофилитом. Структура цемента гранобластовая, бластосаммитовая или бластопсефитовая, текстура сланцеватая. Второстепенные минералы, которыми заметно обогащены отдельные прослои, представлены гематитом, апоильменитовым лейкоксеном и аутигенным рутилом, на некоторых участках распространен хлоритоид. Гематит образует уплощенные зерна размером от мельчайших чешуек до пластинок длиной 1 мм. Магнетит наблюдается только в базальном горизонте свиты, выше по разрезу он исчезает, уступая место гематиту. Акцессорные минералы — циркон, турмалин, апатит, монацит, ксенотим, алланит, спессартин, пьемонтит, эпидот, титанит, лазулит, флоренсит, горсейксит, эвклаз. Сульфиды (пирит, халькопирит) для алькесвожской свиты не характерны и присутствуют в небольшом количестве только в базальном горизонте (Озеров, 1996; Юдович и др., 1998; Ефанова, Повонская, 1999).

К терригенным отложениям алькесвожской свиты приурочено Au-Pd-рудопоявление Нестеровское, представленное вкрапленностью золота, концентрирующегося в виде лентовидных или линзовидных скоплений. На наиболее деформированных участках распределение золота контролируется плоскостями срывов, сланцеватостью, шарнирами складок волочения, искажающими и нередко затушевывающими первичное его распределение. Наиболее богатые руды выявлены в участках осветления или, реже, фукситизации пород. Окатанных частиц золота нет, все золото метаморфизованное. В сростании с золотом отмечаются Pd-минералы — атенеит и мертиит (Ефанова и др., 1999; Ефанова, Юдович, 2002).

Материал и методы исследований

Текстурно-структурные особенности пород алькесвожской свиты изучались в керне скважин, полотно канав и коренных обнажениях на обширной площади в районе рудопоявления Нестеровское и на руч. Быстрый (рис. 1). Хромсодержащие минералы в составе алькесвожской свиты играют скромную роль, однако привлекают к себе особое внимание в связи с тесной взаимосвязью золота с хромсодержащим мусковитом (фукситом) в риолитах месторождения Чудное, менее отчетливо эта связь проявлена в терригенных породах на рудопоявлении Нестеровское.

Характер распределения фуксита в породах определялся главным образом визуально благодаря его хо-

рошо заметной зеленой окраске. Минеральный состав пород изучался при производстве поисково-оценочных работ¹ в петрографических шлифах (Е. А. Котельникова) и концентратах тяжелых минералов (Н. В. Повонская), полученных из измельченных до 1 мм проб. Пробы отбирались из керна скважин, полотна канав и в коренных обнажениях. Кроме того, изучались шлихи, полученные при промывке элювиально-делювиальных отложений. Полученные результаты в части распределения хромсодержащих минералов были учтены в настоящей работе.

Лабораторные исследования проведены на базе ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Cr-содержащие породы ручья Быстрого и рудопоявления Нестеровское изучались в полированных шлифах. Концентраты магнетита из керна буровых скважин (205136 и 206116) и шлиховой пробы 520602 монтировались в эпоксидной смоле, после чего изготавливались полированные препараты. В отраженном свете породы изучались с помощью оптического микроскопа Nikon Eclipse LV 100 ND. Исследование строения и состава минералов проводилось на электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (оператор Е. М. Тропников) и электронном микроскопе KYKY EM-6900 с энергодисперсионным спектрометром Xplore 30 Oxford Instruments (оператор В. А. Радаев). Напряжение 20 кВ, диаметр электронного зонда 1 мкм. Время набора спектров составляло 60–80 сек (600 тыс. импульсов). Эталоны — чистые металлы для Au, Ag, Fe, Cr, Zn, Ti, Mn и V, KBr для K, альбит для Na, волластонит для Ca, MgO для Mg, Al₂O₃ для Al. Погрешность определения в хромшпинелидах (мас. %): Al₂O₃ — 0.12, Cr₂O₃ — 0.17, MnO — 0.1, FeO — 0.17, ZnO — 0.2, погрешность определения в слюдах (мас. %): Al₂O₃ — 0.1, SiO₂ — 0.15, K₂O — 0.06, Cr₂O₃ — 0.06, FeO — 0.06. Полированный шлиф 751513 изучен А. В. Моховым (ИГЕМ РАН) на электронном микроскопе JSEM-5300 с энергодисперсионным спектрометром Link.

Расчет содержаний FeO и Fe₂O₃ в шпинелидах произведен по стехиометрии A²⁺B³⁺₂O₄ на 3 катиона и 4 кислорода.

Результаты

Хромсодержащие минералы в породах алькесвожской свиты распространены неравномерно и встречаются в двух геологических обстановках. В средних и верхних частях разреза свиты отмечаются участки фукситсодержащих пород (участок Альбовский, руч. Быстрый и рудопоявление Нестеровское), в которых изредка встречаются реликты хромшпинелида. В нижней части разреза в базальных гравелитах и конгломератах реликты хромшпинелида обнаружены в магнетите на рудопоявлении Нестеровское (скв. 205 и 206). Во всех обстановках первичным хромовым минералом в породах являлся детритовый хромшпинелид, но процессы и результаты его преобразования довольно сильно различаются.

¹ Ефанова Л. И., Онищенко Л. В., Карчевский А. Ф., Онищенко С. А. и др. Промышленная оценка золоторудных проявлений Алькесвожского участка на хребте Малдындырд: Отчет ГРП за 1997–2005 гг. / Сыктывкар, Комигеолфонд, 2005.

Efanova L. I., Onishchenko L. V., Karchevsky A. F., Onishchenko S. A. et al. Industrial assessment of gold ore occurrences at the Alkesvozhsky site on the Maldynnyrd ridge: exploration crew report for 1997-2005 / Syktyvkar, Komigeolfond, 2005.



Замещение хромшпинелида фукситом

Cr-содержащие породы видны визуально благодаря ярко-зеленой (изумрудной) окраске фуксита. Отмечено, что на участках разреза, где фуксит образует значительные, но размытые полосы и струи, хромшпинелид, как правило, отсутствует. Напротив, в мелких редких выделениях (глазках) фуксита насыщенного зеленого цвета устанавливается наличие хромшпинелида. Именно в таких ярко-зеленых обособлениях фуксита были обнаружены хромшпинелиды на участке Альбовский, оказавшиеся при последующем изучении Zn-Mn-содержащими (Юдович и др., 1997; Макеев и др., 1999; Макеев, Макеев, 2005).

Строение фуксит-хромшпинелидных образований нами изучено в гравелитах и песчаниках алькесвожской свиты (возможно, это нижняя часть обеизской свиты) на ручье Быстром, левом притоке р. Балбанью. В терригенных породах отмечены участки фукситсодержащих зеленых пород мощностью до 0.5 м. Распределение фуксита в них струйчатое или пятнистое (рис. 2, a, b), В ярко-зеленых струйках или пят-

нышках, сложенных почти мономинеральным агрегатом фуксита, выявлены реликты трещиноватых зерен Zn-Mn-содержащих хромшпинелидов. Изредка отмечаются фукситовые прожилки толщиной до 3 мм (рис. 2, c), что указывает на мобилизацию и переотложение хрома при метаморфических процессах.

Хромшпинелид замещается фукситом, в результате чего его зерна, имеющие первоначально размер около 0.2 мм, разобщены на отдельные фрагменты размером 20–40 мкм (рис. 3). Реликтовые хромшпинелиды являются Zn-Mn-содержащими, количество ZnO составляет 8.5–10.7 мас. %, MnO — 4.9–5.7 мас. %, характерно отсутствие MgO (табл. 1). Вариации состава в отдельно взятых зернах невелики, в разных образцах отмечаются некоторые различия в содержании Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Формула наиболее богатого цинком шпинелида — $Fe^{2+}_{0.52}Zn_{0.30}Mn_{0.18}Cr_{1.59}Al_{0.30}Fe^{3+}_{0.10}O_4$.

Содержание Cr_2O_3 в фуксите, замещающем хромшпинелид, варьирует. Наиболее высокое содержание Cr_2O_3 в слюде (5.0–5.9 мас. %) отмечается вблизи зерен хромшпинелида, уменьшаясь по периферии фук-

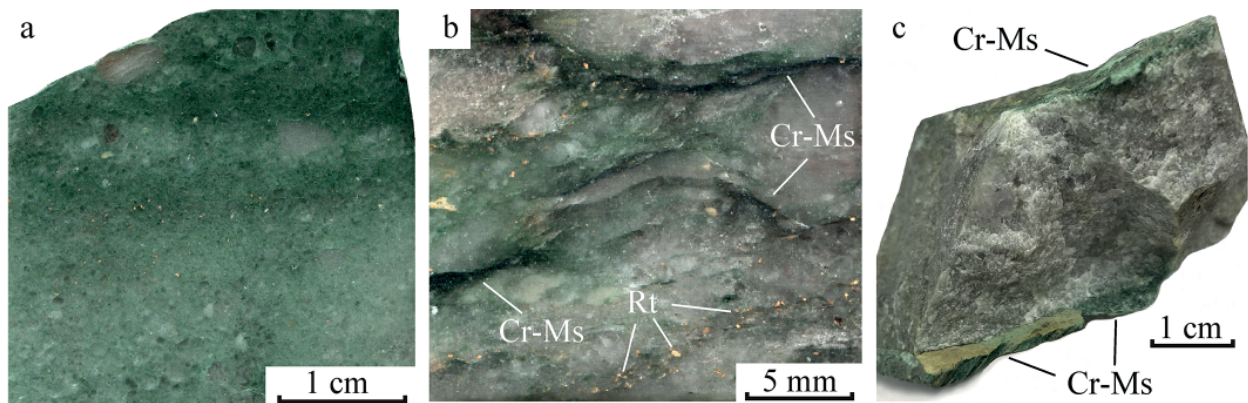


Рис. 2. Фуксит в гравелитах и песчаниках алькесвожской свиты (ручей Быстрый): а — обильный фуксит в цементе породы окрашивает ее в зеленый цвет, обр. 751514; б — струйки фуксита (Cr-Ms) в гравелите, обр. 751513, Rt — рутил; с — прожилки фуксита в гравелите, обр. 2296

Fig. 2. Fuchsite in gravelstones and sandstones of the Alkesvozh suite (Bystry Creek): a — abundant fuchsite in the rock cement gives it a green color, sample 751514; b — fuchsite (Cr-Ms) streaks in the gravelstone, sample 751513, Rt — rutile; c — fuchsite veinlets in the gravelstone, sample 2296

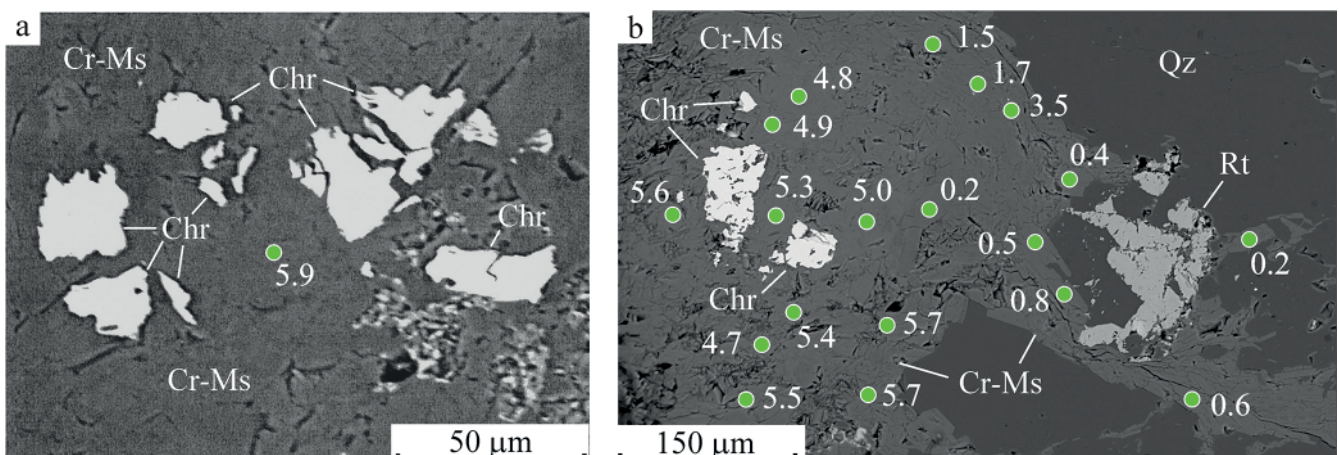


Рис. 3. Реликты Zn-Mn-содержащего хромшпинелида в фуксите (ручей Быстрый). Указано содержание Cr_2O_3 в фуксите в мас. %. Chr — хромшпинелид, Cr-Ms — фуксит, Rt — рутил, Qz — кварц. Полированные шлифы 751513 (a) и 751515 (b). Изображения в отраженных электронах

Fig. 3. Relics of Zn-Mn-bearing chrome spinel in fuchsite (Bystry Creek). The Cr_2O_3 content in fuchsite is indicated in wt.%. Chr — chrome spinel, Cr-Ms — fuchsite, Rt — rutile, Qz — quartz. Polished sections 751513 (a) and 751515 (b). BSE images

Таблица 1. Состав реликтовых Zn-Mn-содержащих хромшпинелидов (ручей Быстрый), мас. %

Table 1. Composition of relict Zn-Mn-containing chrome spinelides (Bystry Creek), wt. %

Оксиды Oxide	751513		751515		
FeO	16.51	17.33	18.07	17.84	17.91
ZnO	10.62	10.68	8.51	9.15	8.75
MnO	5.57	4.90	5.65	5.49	5.73
Cr ₂ O ₃	52.88	54.38	53.37	55.28	56.52
Al ₂ O ₃	6.69	5.51	2.10	2.31	2.11
Fe ₂ O ₃	3.44	3.74	9.91	8.27	7.19
TiO ₂	0.15	0.25	0.0	0.0	0.0
V ₂ O ₃	0.0	0.0	0.28	0.0	0.0
Σ	95.86	96.79	97.88	98.34	98.21

ситового обособления до 0.2–0.8 мас. % Cr₂O₃ (рис. 3, b). Состав наиболее хромистого фуксита (мас. %): SiO₂ — 47.18, TiO₂ — 0.84, Al₂O₃ — 25.46, Cr₂O₃ — 5.86, FeO — 4.10, MgO — 1.83, CaO — 0.20, K₂O — 11.28, Na₂O — не обн., сумма — 96.75. На расстоянии 2–3 мм от фукситовых обособлений наличие хрома в слюде в цементирующей массе породы не фиксируется. В рутиле на периферии фуксит-хромшпинелидных образований Cr не обнаружен (рис. 3, b), в качестве примеси присутствует 0.4–0.5 мас. % FeO.

Первоначальные контуры зерен хромшпинелидов не сохранились, по балансу Cr₂O₃ можно заключить, что замещено примерно 70–80 % объема шпинелидов, хром которых зафиксирован в фуксите.

Значимые результаты получены при изучении рудовмещающих пород проявления Нестеровское, в которых фуксит отмечается преимущественно в виде мелких пятен, но в относительно более деформированных породах присутствуют фукситсодержащие участки линзовидной, линзовидно-пятнистой формы с нечеткими контурами. Мощность их 0.2–1 м, по

простирацию прослеживаются на несколько метров. Распределение фуксита пятнисто-полосчатое, иногда им обогащены отдельные слои мощностью 1–5 см, но нередко фукситсодержащие струйки толщиной 0.5–1 см контролируются плейчатостью, зонами смятий и срывов, что указывает на мобилизацию и переотложение хрома при метаморфических процессах. В некоторых случаях пути миграции Cr и Au совпадали, что приводило к образованию сростаний самородного золота с Cr-содержащими минералами (рис. 4, а).

При минералогических исследованиях фукситсодержащих пород реликтовый хромшпинелид не был обнаружен, видимо, он полностью замещен вторичными метаморфическими Cr-содержащими минералами, среди которых помимо фуксита присутствуют гематит, рутил и хлорит. Кроме того, в шлихе В-221 из элювиально-делювиальных отложений на платообразной поверхности проявления Нестеровское в обломках фуксита обнаружены мелкие (5–20 мкм) новообразованные идиоморфные кристаллики Zn-содержащего хромшпинелида, иногда в сростании с самородным золотом. Таким образом, в деформированных породах рудопрооявления Нестеровское хром, высвободившийся при разложении детритовых хромшпинелидов, от которых никаких видимых следов не осталось, зафиксировался в аутигенно-метаморфогенных фуксите, гематите, рутиле, хлорите и Zn-содержащем хромшпинелиде.

Содержание Cr₂O₃ в фуксите в основном заключено в интервале 1–2 мас. %, в сростании с Zn-содержащим хромшпинелидом несколько выше (до 3.8 мас. %), содержание железа невысокое, почти постоянно отмечается примесь Na₂O (табл. 2).

Содержание Cr₂O₃ в гематите заметно выше, чем в фуксите, и достигает 7.0 мас. % (табл. 3). Для гематита характерна пластинчатая форма зерен (рис. 4, а). В некоторых случаях зерна Cr-содержащего гематита нарастают на детритовые зерна ильменита, нацело замещенные агрегатом рутила и гематита (рис. 4, b), при-

Таблица 2. Состав фуксита (рудопрооявление Нестеровское), мас. %

Table 2. Composition of fuchsite (Nesterovskoye ore occurrence), wt. %

Образец Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Σ
202803	45.88	35.91	1.01	2.31	0.22	10.36	0.94	96.63
	46.35	36.16	0.76	1.88	0.27	9.96	0.90	96.28
	46.16	35.86	1.82	2.07	0.33	10.17	0.79	97.20
	46.21	35.07	1.53	2.46	0.36	9.89	0.68	96.20
	45.74	35.80	0.88	2.32	0.25	10.03	0.77	95.79
102306	47.34	36.03	0.0	2.75	0.0	10.11	0.61	96.83
	46.21	35.00	1.76	1.66	0.42	10.13	0.62	95.80
	46.50	34.74	2.07	1.46	0.29	10.00	0.61	95.67
	46.07	34.75	2.04	1.91	0.29	10.25	0.47	95.78
В-221	44.80	33.88	2.48	2.51	0.27	10.61	0.40	94.95
	45.46	33.29	3.81	2.51	0.0	10.70	0.45	96.22
	45.02	34.19	2.25	2.37	0.31	10.33	0.0	94.47
	45.63	34.86	2.11	2.28	0.0	10.41	0.56	95.85
	45.94	33.45	2.94	2.68	0.31	10.62	0.35	96.29

Примечание. Все железо выражено в форме FeO

Note. All Fe — as FeO

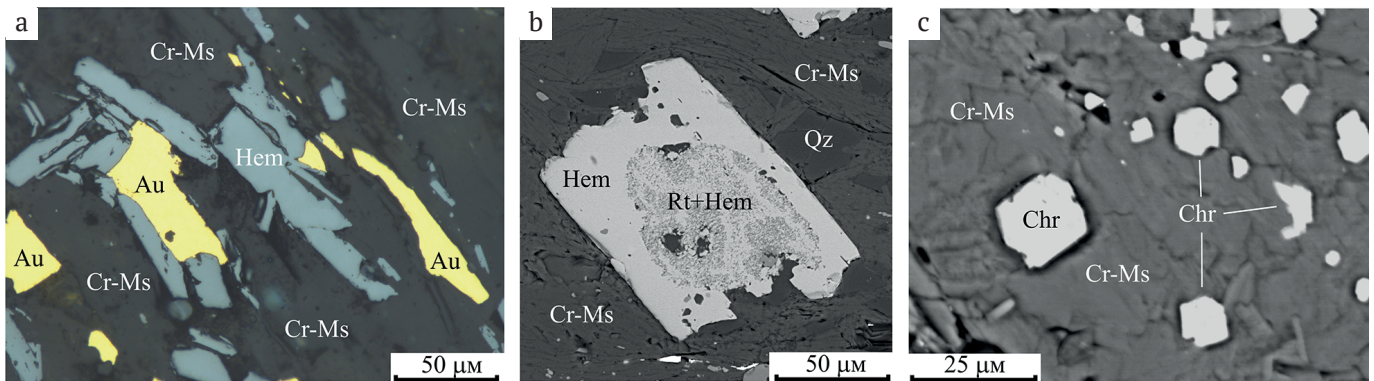


Рис. 4. Метаморфогенные Cr-содержащие минералы и золото в гравелите алькесвожской свиты (рудопроявление Нестеровское): а — пластинки Cr-содержащего гематита (Hem) в сростании с самородным золотом в фуксите (Cr-Ms); б — Cr-содержащий гематит в фукситовой матрице нарастает на апоильменитовый гематит-рутиловый агрегат (Rt+Hem). Qz — кварц; с — идиоморфные кристаллики Zn-содержащего хромшпинелида (Chr) в фуксите. Полированные шлифы 202803 (а, б) и В-221 (с). Изображения в отраженном свете (а) и отраженных электронах (б, с)

Fig. 4. Metamorphic Cr-containing minerals and gold in the gravelstone of the Alkesvozh suite (Nesterovskoye ore occurrence): а — Cr-bearing hematite (Hem) plates intergrown with native gold in fuchsite (Cr-Ms); б — Cr-bearing hematite in a fuchsite matrix grows onto apoilmenite hematite-rutile aggregate (Rt+Hem). Qz — quartz; с — idiomorphic crystals of Zn-containing chrome spinelide. Polished sections 202803 (а, б) and В-221 (с). Reflected light (а) and BSE (б, с) images

Таблица 3. Состав Cr-содержащего гематита (рудопроявление Нестеровское), мас. %

Table 3. Composition of Cr-containing hematite (Nesterovskoye ore occurrence), wt. %

Образец Sample	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Σ
202803	92.87	3.87	1.90	0.0	98.64
	92.82	4.17	1.81	0.0	98.80
	92.92	3.80	1.69	0.0	98.41
102306	88.22	7.02	1.63	0.23	97.10
	89.34	6.76	1.46	0.21	97.77

чем в микрозернистом агрегате последних Cr также фиксируется: в гематитовой части — до 5.3 мас. % Cr₂O₃, в рутиловой — до 2.0 мас. % Cr₂O₃.

Рутил, помимо агрегатных скоплений по ильмениту, присутствует в фукситсодержащих породах в виде самостоятельных зерен неправильной формы размером около 0.1 мм. Обычное содержание Cr₂O₃ в рутиле 0.7–1.2 мас. %, другие примеси (мас. %): FeO — 0.2–1.9, Nb₂O₅ — до 0.7, реже встречается V₂O₅ — до 0.9.

Хлорит отмечается в фукситсодержащих породах в подчиненном количестве. Содержание Cr₂O₃ заключено в интервале 0.7–1.2 мас. %, отмечается примесь NiO до 0.4 мас. % (табл. 4).

В Zn-содержащем хромшпинелиде среди двухвалентных элементов преобладают Fe и Zn, вариации содержания минералообразующих компонентов заключены в следующих пределах (мас. %): FeO — 14.8–18.1, ZnO — 14.4–18.1, MnO — 1.4–1.7, Cr₂O₃ — 42.4–45.7, Fe₂O₃ — 12.2–18.4, Al₂O₃ — 5.0–7.4 (табл. 5).

Замещение хромшпинелида магнетитом

В базальных гравелитах и конгломератах алькесвожской свиты на рудопроявлении Нестеровское в метаморфогенном магнетите присутствуют реликты хромшпинелидов, которые обнаруживаются при изучении магнитной фракции пород в полированных шлифах. Магнетит представлен октаэдрическими кристал-

Таблица 4. Состав Cr-содержащего хлорита (рудопроявление Нестеровское), мас. %

Table 4. Composition of Cr-containing chlorite (Nesterovskoye ore occurrence), wt. %

Оксиды Oxide	202803			
	SiO ₂	25.77	26.26	26.36
Al ₂ O ₃	25.44	24.58	25.00	25.26
Cr ₂ O ₃	0.91	1.23	0.68	1.11
FeO	19.35	18.61	17.41	17.80
MnO	0.0	0.0	0.18	0.20
MgO	16.94	17.20	17.57	17.57
NiO	0.0	0.0	0.39	0.34
Σ	88.41	87.88	87.59	89.07

лами и зернами угловатой формы размером 0.08–0.50 мм, частично замещенными гематитом. Реликты хромшпинелидов в кристаллах магнетита встречаются нечасто, детально изучен состав и строение 20 зерен. Реликты имеют изометричную или неправильную форму. Активное замещение хромшпинелида магнетитом приводит к его фрагментации, примесь Cr присутствует в магнетите вблизи реликтов хромшпинелида и не отмечается во внешних зонах кристаллов магнетита. Состав хромшпинелидов в различных зернах различается по содержанию Cr₂O₃, Al₂O₃ и Fe₂O₃, изредка отмечается примесь TiO₂ и V₂O₅, среди двухвалентных компонентов преобладает FeO, во всех зернах заметную роль в составе играют ZnO и MnO. Содержания MnO невелики и заключены в интервале 1.7–3.6 мас. %. Содержания ZnO в хромшпинелидах, напротив, изменяются значительно как от зерна к зерну, так и в пределах одного зерна, минимальное содержание ZnO составляет 1.3, максимальное — 17.5 мас. %.

По общему составу и особенностям распределения элементов реликтовые хромшпинелиды разделяются на три группы. Первую группу составляют *безмагниево-хромшпинелиды* с относительно однород-

Таблица 5. Состав новообразованных Zn-содержащих хромшпинелидов (рудопоявление Нестеровское), мас. %**Table 5.** Composition of newly formed Zn-containing chrome spinelides (Nesterovskoye ore occurrence), wt. %

FeO	ZnO	MnO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Σ	Формула / Formula
17.43	15.15	1.38	42.43	17.50	6.06	99.95	(Fe ²⁺ _{0.54} Zn _{0.42} Mn _{0.04})(Cr _{1.25} Fe ³⁺ _{0.49} Al _{0.26}) ₂ O ₄
16.37	15.92	1.72	45.72	13.25	6.52	99.50	(Fe ²⁺ _{0.51} Zn _{0.44} Mn _{0.05})(Cr _{1.34} Fe ³⁺ _{0.37} Al _{0.29}) ₂ O ₄
17.71	14.59	1.37	43.49	17.22	5.21	99.59	(Fe ²⁺ _{0.56} Zn _{0.40} Mn _{0.04})(Cr _{1.29} Fe ³⁺ _{0.48} Al _{0.23}) ₂ O ₄
17.30	14.88	1.52	42.79	18.35	4.96	99.80	(Fe ²⁺ _{0.54} Zn _{0.41} Mn _{0.05})(Cr _{1.26} Fe ³⁺ _{0.52} Al _{0.22}) ₂ O ₄
16.16	16.38	1.64	44.26	14.46	6.88	99.78	(Fe ²⁺ _{0.50} Zn _{0.45} Mn _{0.05})(Cr _{1.30} Fe ³⁺ _{0.40} Al _{0.30}) ₂ O ₄
14.89	17.53	1.59	45.62	12.17	7.00	98.80	(Fe ²⁺ _{0.47} Zn _{0.48} Mn _{0.05})(Cr _{1.35} Fe ³⁺ _{0.34} Al _{0.31}) ₂ O ₄
17.15	15.20	1.50	44.48	14.25	6.59	99.17	(Fe ²⁺ _{0.53} Zn _{0.42} Mn _{0.05})(Cr _{1.31} Fe ³⁺ _{0.40} Al _{0.29}) ₂ O ₄
17.39	15.08	1.61	43.54	14.51	7.41	99.54	(Fe ²⁺ _{0.54} Zn _{0.41} Mn _{0.05})(Cr _{1.27} Fe ³⁺ _{0.41} Al _{0.32}) ₂ O ₄
18.11	14.38	1.46	42.88	16.69	6.40	99.92	(Fe ²⁺ _{0.56} Zn _{0.39} Mn _{0.05})(Cr _{1.26} Fe ³⁺ _{0.46} Al _{0.28}) ₂ O ₄
14.75	18.06	1.36	44.04	13.58	7.29	99.08	(Fe ²⁺ _{0.46} Zn _{0.50} Mn _{0.04})(Cr _{1.30} Fe ³⁺ _{0.38} Al _{0.32}) ₂ O ₄

ным распределением Zn. Вторую и третью группу составляют хромшпинелиды с неоднородным распределением элементов: зерна зонального строения с остаточными содержаниями MgO в центре зерен и высокими содержаниями ZnO по периферии и Zn-содержащие хромшпинелиды глиноземистого состава, замещаемые феррихромитом и хроммагнетитом.

Безмагнетитовые разности с относительно равномерным распределением Zn наиболее распространены среди реликтовых зерен хромшпинелидов. Содержание ZnO в отдельных зернах заключено в интервалах от 3.4–8.8 до 9.8–12.4 мас. %, остальных компонентов (мас. %): Cr₂O₃ – от 37.1–38.5 до 52.8–53.1, Al₂O₃ – от 5.0–5.1 до 12.6–12.8, Fe₂O₃ – от 3.0–3.6 до 18.8–19.6, FeO – от 19.9–23.8 до 26.7–27.5, MnO – от 1.7–1.9 до 3.1–3.5. Обращает на себя внимание значительное содержание Fe₂O₃ в некоторых хромшпинелидах, при этом они заметно не отличаются от других зерен по содержанию ZnO. Строение хромшпинелидов в этой группе довольно разнообразно, часто отмечается коррозия и разделение зерен на отдельные фрагменты, первоначальная форма детритовых зерен утрачивается (рис. 5). В некоторых случаях в магнетите присутствуют пластинки гематита, развивающиеся главным образом по трещинам отдельности (рис. 5, с–е).

Весьма сложную морфологию реликты хромшпинелида приобретают в результате совместного замещения магнетитом и хлоритом. Вместе с тем вариации состава хромшпинелида по данным 4-х определений невелики (мас. %): Cr₂O₃ – 42.0–42.2, Al₂O₃ – 12.6–12.8, Fe₂O₃ – 8.9–9.0, FeO – 26.0, MnO – 2.5, ZnO – 5.9–6.1, TiO₂ – 0.5. Содержание Cr₂O₃ в окружающем магнетите составляет 2.2–2.8 мас. % (рис. 5, а).

Существенные детали замещения хромшпинелида магнетитом выяснились при изучении зерна 205136_1 (рис. 5, b). Монолитная часть хромшпинелида содержит (мас. %): Cr₂O₃ – 46.6–47.2, Al₂O₃ – 12.8–13.0, Fe₂O₃ – 3.6–4.6, FeO – 20.5–23.8, MnO – 2.4–2.7, ZnO – 7.7–11.5. Наиболее высокое содержание Zn отмечено вблизи границы с магнетитом, состав хромшпинелида (мас. %): Cr₂O₃ – 46.4, Al₂O₃ – 12.6, Fe₂O₃ – 4.8, FeO – 19.9, MnO – 2.5, ZnO – 12.0, формула Fe²⁺_{0.60}Zn_{0.32}Mn_{0.08}

Cr_{1.33}Al_{0.54}Fe³⁺_{0.13}O₄. Характер изменений на границе с магнетитом определен при анализе мелких реликтов хромшпинелида в магнетите. Таким образом установлено, что в зоне контакта в хромшпинелиде происходит очень значительная потеря Al₂O₃ и столь же значительное увеличение содержания трехвалентного железа при практически неизменном содержании Cr₂O₃ (мас. %): Cr₂O₃ – 44.9, Al₂O₃ – 2.5, Fe₂O₃ – 18.0, FeO – 21.6, MnO – 3.5, ZnO – 6.7; формула Fe²⁺_{0.70}Zn_{0.19}Mn_{0.11}Cr_{1.37}Al_{0.11}Fe³⁺_{0.52}O₄. Содержание Cr₂O₃ в магнетите на удалении 25 мкм от контакта с хромшпинелидом составляет 0.7–0.9 мас. %.

В некоторых случаях реликтовый хромшпинелид сохраняет относительно монолитное строение (рис. 5, e). Содержание компонентов равномерное по всему зерну (мас. %): Cr₂O₃ – 42.4–44.5, Al₂O₃ – 10.3–11.0, Fe₂O₃ – 9.2–11.2, FeO – 24.5–26.0, MnO – 2.1–2.3, ZnO – 6.2–6.5. Содержание ZnO незначительно увеличивается до 6.6–6.8 мас. % на границе с магнетитом (рис. 5, f). Содержание Cr₂O₃ в магнетите на расстоянии 5 мкм от контакта с хромшпинелидом составляет 2.0 мас. %, уменьшаясь по мере удаления от контакта.

Среди безмагнетитовых хромшпинелидов более отчетливое увеличение содержания ZnO в периферической части отмечено в зерне 206116_3 (рис. 6). Хромшпинелид замещается магнетитом, магнетит, в свою очередь, замещается гематитом. Гематит развивается в магнетите в виде мелких пятен вдоль трещин, полностью окружает зерно хромшпинелида и глубоко проникает в него по прожилкам. Распределение ZnO в хромшпинелиде имеет слабо выраженный V-образный профиль. В центральной части с минимумом ZnO (мас. %): Al₂O₃ – 7.3–7.7, Cr₂O₃ – 49.0–52.3, Fe₂O₃ – 6.3–7.5, FeO – 22.3–22.8, MnO – 2.6–2.7, ZnO – 7.6–8.1. Обогащение цинком краевой части хромшпинелида сопровождается заметным уменьшением количества Cr₂O₃ и увеличением содержания Fe₂O₃ (мас. %): Al₂O₃ – 8.8, Cr₂O₃ – 43.3, Fe₂O₃ – 10.8, FeO – 19.6, MnO – 2.6, ZnO – 11.2, что соответствует увеличению содержания магнетитового минала с 9 до 15 мол. %. Гематит содержит 2.5–3.6 мас. % Cr₂O₃ в оторочке, окружающей хромшпинелид, и 7.2–7.4 мас. % Cr₂O₃ в прожилках ге-

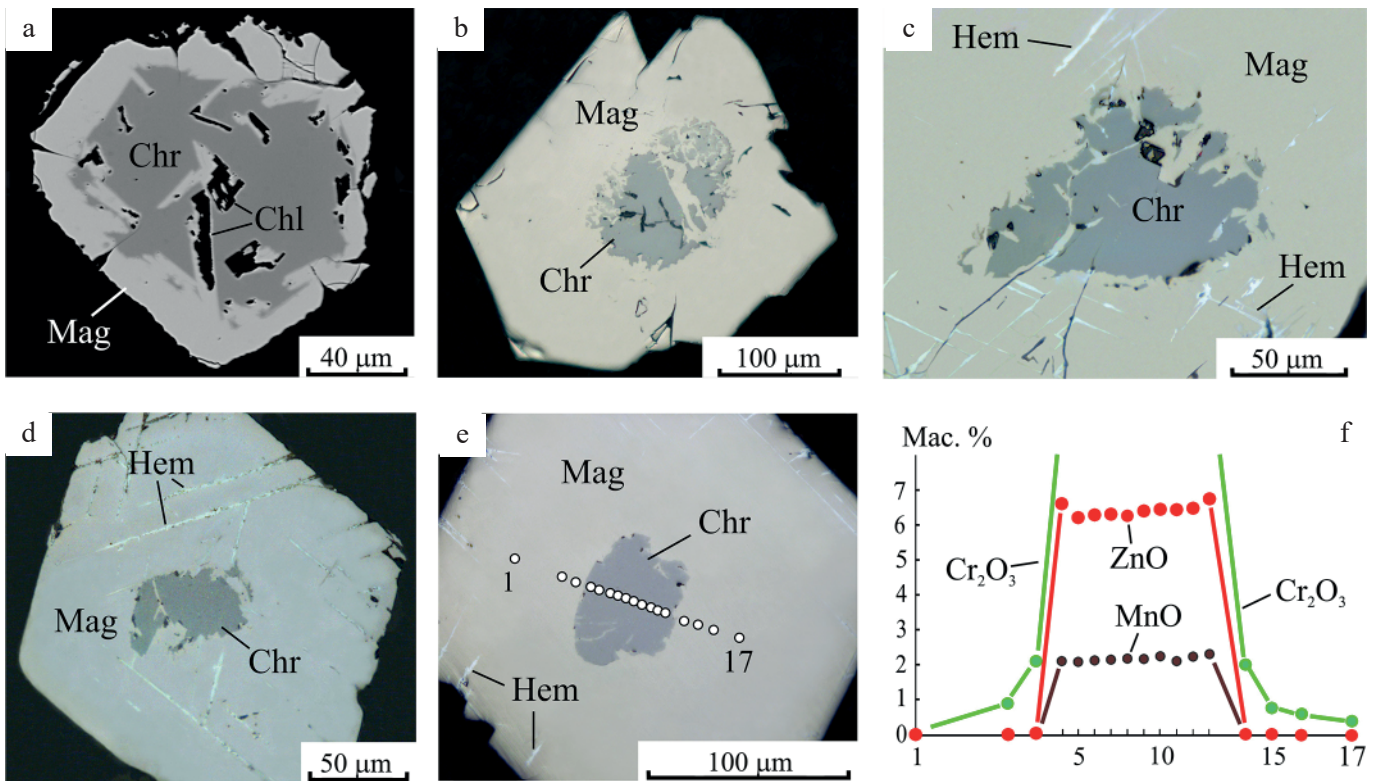


Рис. 5. Реликты хромшпинелида в кристаллах магнетита: а – магнетит совместно с хлоритом глубоко проникает в хромшпинелид, зерно 520602_5; б – реликты хромшпинелида разобщены на многочисленные фрагменты, 205136_1; в – реликты хромшпинелида в магнетите корродированы и расчленены на отдельные фрагменты, 520602_12; д – хромшпинелид замещается магнетитом, в свою очередь магнетит по трещинам замещается гематитом. В магнетите содержатся разобщенные реликты хромшпинелида, 520602_3; е – хромшпинелид относительно монолитного строения замещается магнетитом, 520602_11; ф – распределение элементов в профиле через зерно (рис. 5, е). Изображения в отраженных электронах (а) и отраженном свете (б–е)

Fig. 5. Relics of chrome spinel in magnetite crystals: а – magnetite together with chlorite deeply penetrates chrome spinel, grain 520602_5; б – chrome spinel relics are separated into numerous fragments, 205136_1; в – chrome spinel relics in magnetite are corroded and dismembered into separate fragments, 520602_12; д – chrome spinel is replaced by magnetite, in turn, magnetite is replaced by hematite along cracks. Magnetite contains separated relics of chrome spinel, 520602_3; е – chrome spinel of relatively monolithic structure is replaced by magnetite, 520602_11; ф – distribution of elements in the profile through the grain (fig. 5, e). Images in reflected electrons (a) and reflected light (b–e)

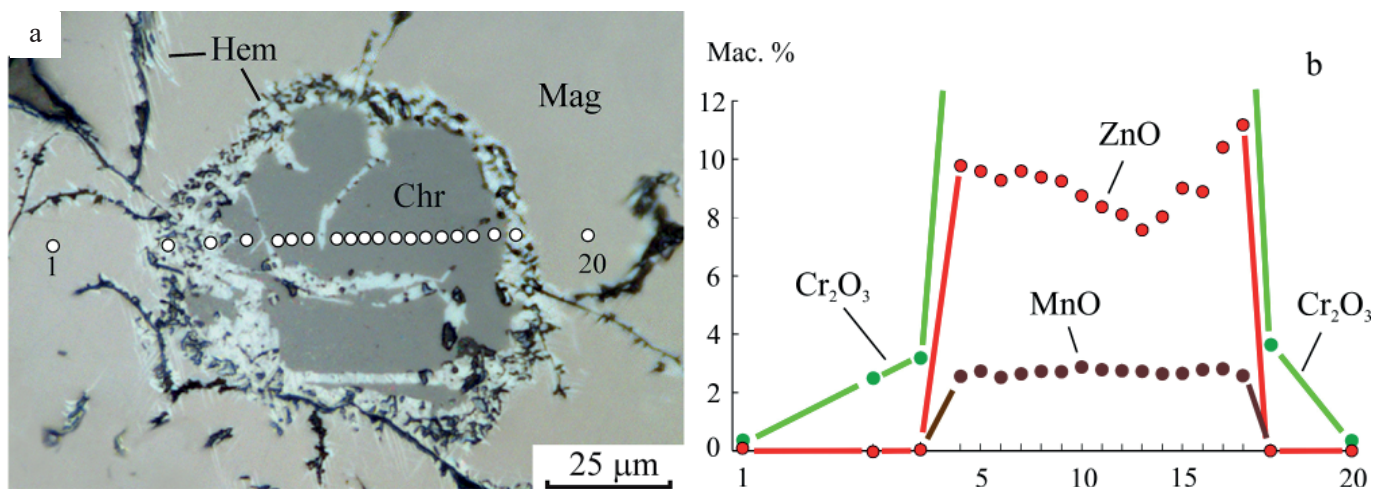


Рис. 6. Реликтовый хромшпинелид в магнетите: а – хромшпинелид (Chr) замещается магнетитом (Mag), гематит (Hem) окружает зерно хромшпинелида и проникает в него по прожилкам. Изображение в отраженном свете; б – распределение элементов в профиле. Зерно 206116_3

Fig. 6. Relict chrome spinel in magnetite: а – chrome spinel (Chr) is replaced by magnetite (Mag), hematite (Hem) surrounds the chrome spinel grain and penetrates it through veins. Image in reflected light; б – distribution of elements in the profile. Grain 206116_3

матита. Содержание Cr_2O_3 в магнетите составляет 0.4 мас. % (точки 1 и 20).

В зернах с ярко выраженным зональным распределением ZnO и наличием MgO в центральной части (рис. 7 и 8) наиболее отчетливо проявляются закономерности миграции элементов при преобразовании хромшпинелидов. Хром, мобилизованный из хромшпинелида, частично фиксировался в замещающем его магнетите, магний и двухвалентное железо замещались цинком. Следует указать, что зональное строение зерен хромшпинелидов не заметно ни в отраженном свете, ни в отраженных электронах и выявляется только при профильном изучении состава минерала.

Распределение ZnO в хромшпинелиде имеет V-образный профиль (рис. 7). Максимальные содержания ZnO (до 8.4 мас. %) отмечены на фронте замещения магнетитом, минимальные (1.8 мас. %) — в центральной части зерна. Здесь же отмечено наличие MgO (0.8–1.0 мас. %), свидетельствующее, что первоначально

но хромшпинелид был Mg -содержащим. Вариации FeO составляют 24.1–29.5 мас. %. Содержание Zn связано обратной зависимостью с содержанием ($\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}$), Zn изоморфно замещает Fe^{2+} и Mg в структуре минерала (рис. 7, с). Формула наиболее бедного цинком шпинелида — $\text{Fe}^{2+}_{0.83}\text{Zn}_{0.04}\text{Mn}_{0.08}\text{Mg}_{0.05}\text{Cr}_{1.19}\text{Al}_{0.65}\text{Fe}^{3+}_{0.14}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_4$, наиболее богатого цинком — $\text{Fe}^{2+}_{0.71}\text{Zn}_{0.22}\text{Mn}_{0.08}\text{Cr}_{1.19}\text{Al}_{0.62}\text{Fe}^{3+}_{0.16}\text{Ti}_{0.01}\text{O}_4$. Относительно стабильно по профилю содержание других оксидов (мас. %): Cr_2O_3 — 42.3–43.4, Al_2O_3 — 14.8–15.8, Fe_2O_3 — 4.1–6.0 и MnO — 2.3–2.8.

Замещение шпинелида магнетитом сопровождалось мобилизацией хрома, который частично фиксировался в замещающем минерале. Содержание Cr_2O_3 в магнетите составляет 3.5 и 5.9 мас. % в непосредственной близости от хромшпинелида, уменьшаясь по мере удаления от контакта.

На рис. 8 картина замещения хромшпинелида магнетитом усложнена наличием гематита, который, за-

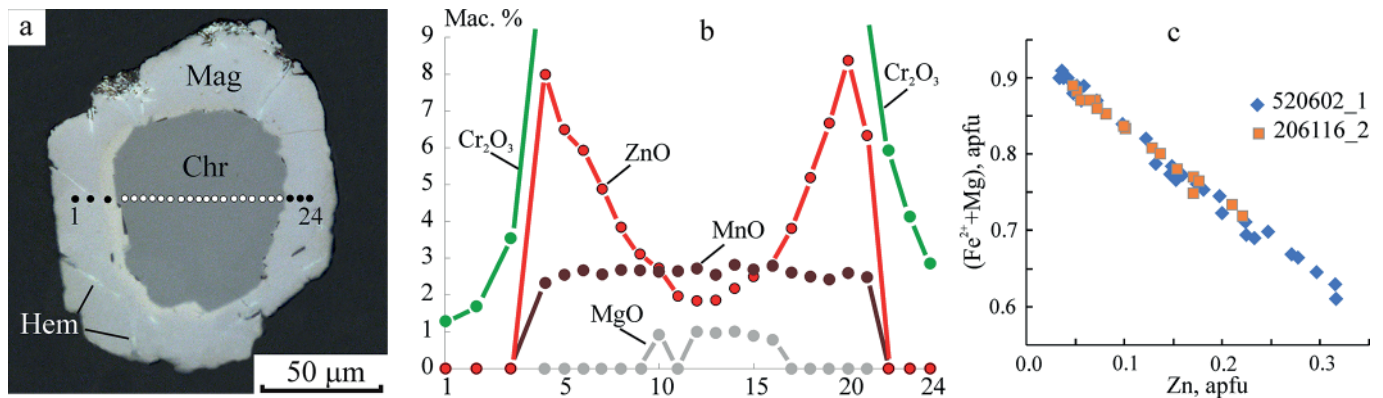


Рис. 7. Закономерности распределения элементов при замещении хромшпинелида магнетитом: а — хромшпинелид (Chr) в магнетите (Mag), Hem — гематит. Изображение в отраженном свете. Зерно 520602_1; б — микрозондовый профиль через зерно хромшпинелида, замещаемое магнетитом; с — вариации содержаний двухвалентных катионов в хромшпинелидах, apfu — коэффициент в формуле минерала

Fig. 7. Patterns of distribution of elements when replacing chrome spinelide with magnetite: а — chrome spinelide (Chr) in magnetite (Mag), Hem — hematite. Reflected light image. Grain 520602_1; б — microprobe profile through a chrome spinelide grain replaced by magnetite; с — variations in the contents of divalent cations in chrome spinelides

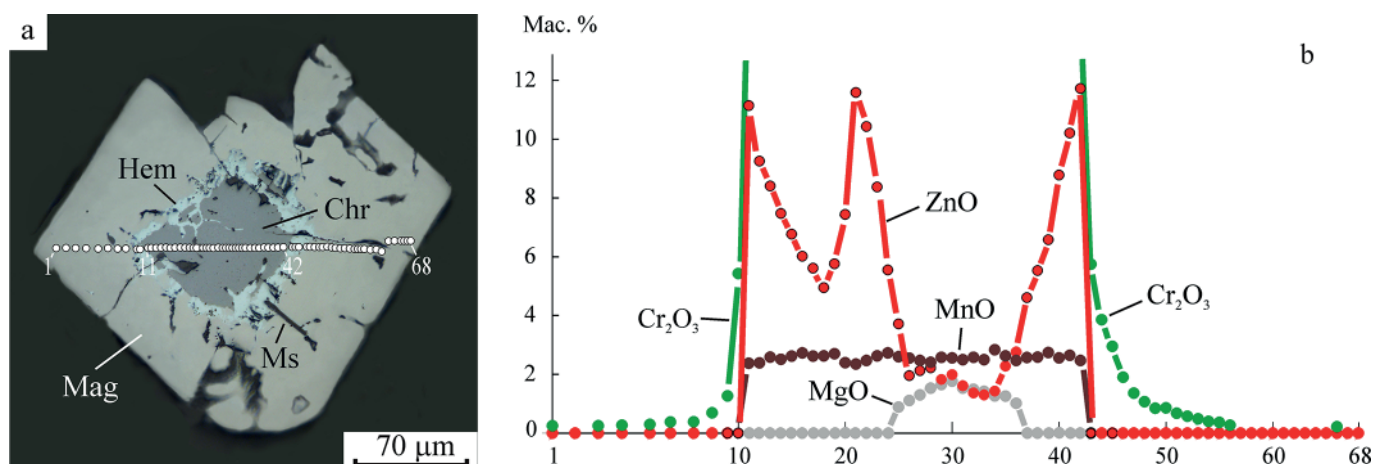


Рис. 8. Распределение элементов при замещении хромшпинелида магнетитом: а — изображение в отраженном свете, показаны точки анализа. Chr — хромшпинелид, Mag — магнетит, Hem — гематит, Ms — мусковит; б — микрозондовый профиль через зерно хромшпинелида, замещаемое магнетитом. Зерно 206116_2

Fig. 8. Distribution of elements when replacing chrome spinelide with magnetite: а — reflected light image, analysis points are shown. Chr — chrome spinel, Mag — magnetite, Hem — hematite, Ms — muscovite; б — microprobe profile through a chrome spinel grain replaced by magnetite. Grain 206116_2



меща магнетит, развивался преимущественно вдоль границы с хромшпинелидом. Первоначальные контуры хромшпинелида примерно соответствуют внешнему краю гематитового кольца. Это видно по характеру распределения мелких включений хромшпинелида в гематите; замещено 15–20 % первоначального объема хромшпинелида.

Распределение ZnO в хромшпинелиде имеет не V-, а W-образный профиль, обусловленный глубоким проникновением гематита (по магнетиту) в замещаемое зерно хромшпинелида. Максимальные содержания ZnO (до 11.7 мас. %) отмечены на контакте с гематитом, минимальные (1.3 мас. %) — в центральной части зерна. Здесь же отмечено наличие MgO (1.1–1.8 мас. %), свидетельствующее, что первоначально хромшпинелид был Mg-содержащим. Для центральной, наименее измененной части, характерно более высокое содержание FeO и, напротив, весьма низкое Fe₂O₃ (1.3–1.7 мас. %). В целом вариации FeO составляют 20.7–28.3 мас. %. Более стабильно содержание других элементов (мас. %): Cr₂O₃ — 48.5–52.1, Al₂O₃ — 11.2–13.0 и MnO — 2.4–2.7 (табл. 6). Количество Zn связано обратной зависимостью с содержанием (Fe²⁺ + Mg): формула наиболее бедного цинком шпинелида — Fe²⁺_{0.82}Zn_{0.03}Mn_{0.08}Mg_{0.07}Cr_{1.41}Al_{0.52}Fe³⁺_{0.06}V_{0.01}O₄ (точка 33), наиболее богатого цинком — Fe²⁺_{0.61}Zn_{0.31}Mn_{0.08}Cr_{1.40}Al_{0.48}Fe³⁺_{0.11}V_{0.01}O₄ (точка 42).

Содержание Cr₂O₃ в магнетите составляет 5.4 и 5.8 мас. % в непосредственной близости от хромшпинелида, уменьшаясь по мере удаления от контакта. Магнетит включает удлиненные частицы мусковита, содержащего около 1 мас. % Cr₂O₃.

Замещение глиноземистых хромшпинелидов магнетитом происходит весьма своеобразно. Специфика такого замещения заключается в широком развитии каём и прожилков феррихромит-хроммагнетитового состава, причем повышение содержания Zn в замещаемом шпинелиде определенно контролируется фронтом замещения.

В центральной части относительно крупного (0.5 мм) кристалла магнетита присутствует зерно хромшпинелида. Содержание Cr₂O₃ в магнетите составляет 0.9–1.1 мас. % вблизи хромшпинелида, уменьшаясь до 0.4–0.5 на расстоянии 20–30 мкм, далее 50 мкм Cr в магнетите не фиксируется. В магнетите по трещинкам в небольшом количестве развивается гематит (рис. 9). Каймы и прожилки феррихромит-хроммагнетитового состава развиваются в хромшпинелиде со стороны как магнетита, так и включений хлорит-фукситового состава, прожилки пронизывают зерно хромшпинелида. Минимальное содержание ZnO в хромшпинелиде 4.3 мас. %, высокие содержания ZnO (12.2–14.2 мас. %) отмечаются на участках, окаймляющих прожилки железистых шпинелидов, наиболее высокие содержания ZnO (до 16.5 мас. %) отмечены в мелких реликтах (рис. 9, b). Цинк замещает двухвалентное железо, при этом в хромшпинелиде заметно возрастает содержание трехвалентного железа, изменения в содержании прочих компонентов невелики (табл. 7).

Прожилки имеют зональное строение, центральная часть сложена Cr-содержащим мусковитом (присутствует не всегда) и хроммагнетитом; внешняя, прилегающая к хромшпинелиду, — феррихромитом. Феррихромит резко отличается по составу от замеща-

Таблица 6. Состав минералов по профилю через кристалл магнетита с реликтовым хромшпинелидом (мас. %)

Table 6. Composition of minerals along the profile through a magnetite crystal with relict chrome spinelide (wt.%)

Точка Point	Минерал Mineral	FeO	ZnO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Σ
3	Mag	30.42	0.0	0.0	0.0	0.25	0.0	67.35	0.0	98.02
6	Mag	30.32	0.0	0.0	0.0	0.38	0.0	66.99	0.0	97.69
9	Hem	0.0	0.0	0.0	0.0	1.27	0.0	99.06	0.0	100.33
10	Hem	0.0	0.0	0.0	0.0	5.43	0.0	92.11	0.0	97.54
11	Chr	20.91	11.14	2.38	0.0	49.41	11.38	3.69	0.26	99.17
13	Chr	23.18	8.41	2.59	0.0	49.48	11.82	3.08	0.24	98.80
16	Chr	25.26	6.02	2.73	0.0	50.55	11.76	2.29	0.26	98.87
19	Chr	25.57	5.76	2.70	0.0	51.25	11.49	2.37	0.0	99.14
20	Chr	24.23	7.44	2.40	0.0	50.22	11.75	2.40	0.27	98.71
22	Chr	21.46	10.43	2.47	0.0	50.06	11.99	2.03	0.30	98.74
23	Chr	22.85	8.37	2.63	0.0	50.04	11.86	1.98	0.0	97.73
26	Chr	27.63	1.96	2.55	1.11	51.84	11.66	2.28	0.35	99.38
30	Chr	26.58	1.99	2.56	1.77	51.29	12.45	2.06	0.29	98.99
32	Chr	27.11	1.37	2.58	1.49	52.12	11.20	1.99	0.32	98.18
33	Chr	27.75	1.30	2.50	1.42	50.71	12.55	2.25	0.26	98.74
35	Chr	27.32	2.28	2.63	1.26	50.72	12.96	2.17	0.32	99.66
38	Chr	25.67	5.53	2.59	0.0	49.69	12.48	1.98	0.0	97.94
41	Chr	21.59	10.21	2.65	0.0	49.53	11.82	3.06	0.35	99.21
42	Chr	19.98	11.72	2.47	0.0	48.49	11.16	4.16	0.35	98.33
43	Hem	0.0	0.0	0.0	0.0	5.75	0.0	91.72	0.0	97.47
44	Hem	0.0	0.0	0.0	0.0	3.86	0.0	93.64	0.0	97.50
45	Hem	0.0	0.0	0.0	0.0	2.95	0.0	95.15	0.0	98.10
48	Mag	29.93	0.0	0.0	0.0	1.07	0.0	65.41	0.0	96.41
53	Mag	29.84	0.0	0.0	0.0	0.49	0.0	65.81	0.0	96.14

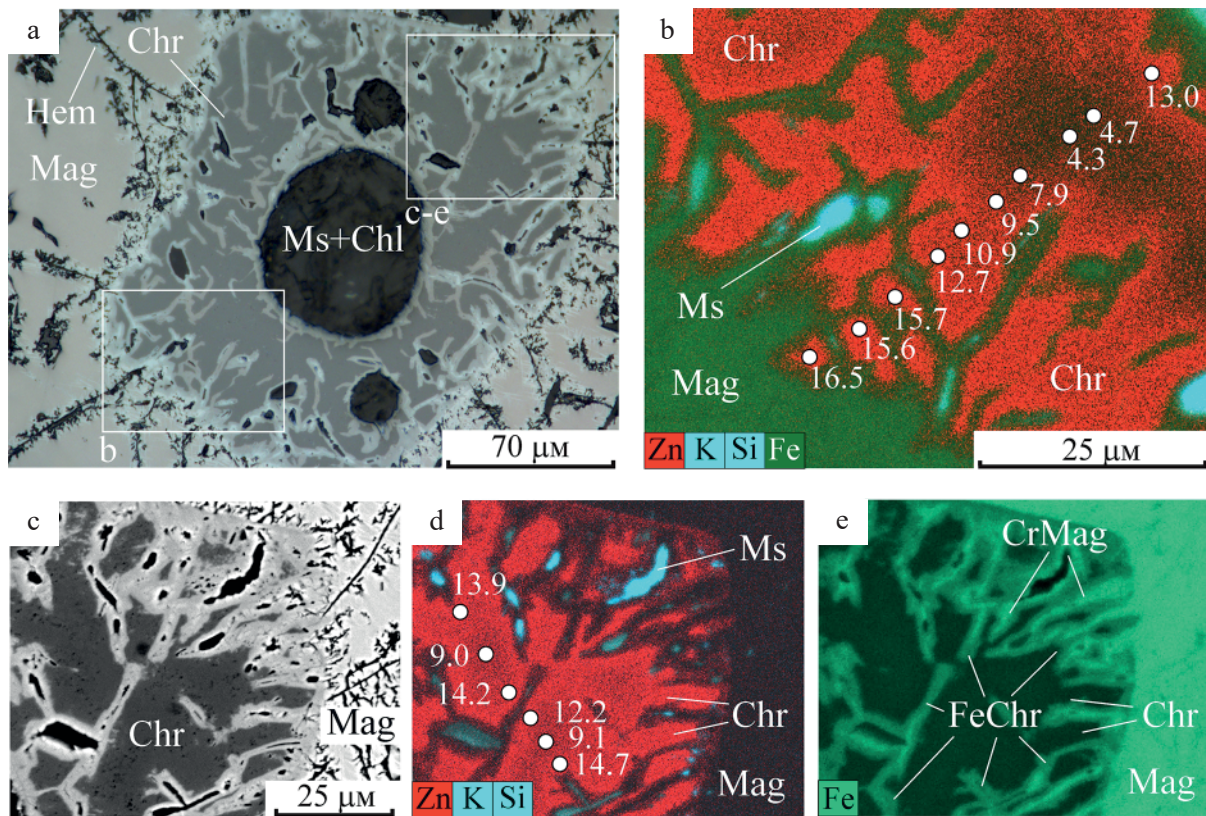


Рис. 9. Замещение глиноземистого хромшпинелида феррихромитом и хроммагнетитом: а — хромшпинелид заключен в магнетите и содержит включения хлорит-фукситового состава; б — наиболее высокие содержания ZnO (мас. %) в хромшпинелиде наблюдаются на фронте замещения феррихромитом и хроммагнетитом; с-е — каймы и прожилки феррихромит-хроммагнетитового состава в Zn-содержащем хромшпинелиде. Изображения в отраженном свете (а), в отраженных электронах (с), многослойные в характеристическом излучении элементов (b, d) и в характеристическом излучении Fe (с). Зерно 206116_1

Fig. 9. Replacement of aluminous chrome spinel with ferrichromite and chromium magnetite: a — Cr-spinel is encased in magnetite and contains chlorite-fuchsite inclusions; b — the highest ZnO contents (wt%) in Cr-spinel are observed at the front of substitution with ferrichromite and chromium magnetite; c-e — rims and veinlets of ferrichromite-chromium-magnetite composition in Zn-containing chrome spinelide. Reflected light (a), reflected electron (c), multilayered elemental characteristic radiation (b, d), and Fe characteristic radiation (c) images. Grain 206116_1

емого хромшпинелида, в нем очень мало глинозема и, напротив, много Fe_2O_3 , содержание ZnO 2.8–3.9 мас. %, что существенно меньше, чем в прилегающих участках хромшпинелида. В хроммагнетите значительно уменьшается содержание Cr_2O_3 и еще более увеличивается содержание Fe_2O_3 (табл. 7).

При более полном замещении глиноземистого хромшпинелида феррихромитом и магнетитом от него остаются только мельчайшие реликты (рис. 10). Остатки хромшпинелида характеризуются стабильным составом и весьма высокими содержаниями Zn (мас. %): ZnO — 17.0–17.5, Al_2O_3 — 24.1–25.1, Cr_2O_3 — 30.6–31.6, Fe_2O_3 — 5.5–6.6, FeO — 18.1–18.9, MnO — 1.9–2.0, TiO_2 — 0.4–0.6. Формула наиболее богатого Zn минерала — $\text{Fe}^{2+}_{0.52}\text{Zn}_{0.44}\text{Mn}_{0.05}\text{Cr}_{0.82}\text{Al}_{1.01}\text{Fe}^{3+}_{0.14}\text{Ti}_{0.02}\text{O}_4$. В феррихромите, замещающем хромшпинелид, содержания Zn существенно ниже, резко уменьшается содержание Al, возрастает содержание двухвалентного и особенно трехвалентного Fe (мас. %): ZnO — 3.7–4.9, Al_2O_3 — 1.5–2.3, Cr_2O_3 — 25.6–28.4, Fe_2O_3 — 36.2–39.8, FeO — 24.0–25.2, MnO — 2.7–2.9. Формула наиболее богатого Cr минерала — $\text{Fe}^{2+}_{0.79}\text{Zn}_{0.12}\text{Mn}_{0.09}\text{Cr}_{0.85}\text{Al}_{0.11}\text{Fe}^{3+}_{1.04}\text{O}_4$.

В магнетитовых прожилках, заключенных в феррихромите, содержание Cr_2O_3 составляет 3.1–3.8 мас. %, другие компоненты (Al_2O_3 , ZnO и MnO), присущие замещаемому хромшпинелиду, не обнаружены. В зерне магнетита, окружающем зерно хромшпинелида, содержание Cr_2O_3 составляет 0.9 мас. %.

другие компоненты (Al_2O_3 , ZnO и MnO), присущие замещаемому хромшпинелиду, не обнаружены. В зерне магнетита, окружающем зерно хромшпинелида, содержание Cr_2O_3 составляет 0.9 мас. %.

Обсуждение результатов

Состав всех зерен хромшпинелидов в терригенных породах алькесвожской свиты является вторичным, в них практически нет магния, характерного элемента, присущего первичным магматогенным хромшпинелидам. Остаточные содержания MgO (до 1.8 мас. %) сохранились только в центральных частях некоторых зерен. Соотношения трехвалентных катионов более устойчивы к внешним воздействиям и отражают в какой-то степени первоначальный состав хромшпинелида. Это заключение основано на литературных данных (например, Staddon et al., 2021) и подтверждается нашими наблюдениями. К примеру, в зернах хромшпинелидов с зональным строением при значительных изменениях в составе двухвалентных катионов соотношения между трехвалентными катионами практически не изменяются (зерна 206116_2 и 520602_1, состав на рис. 11, а обозначен кольцами). Состав дитриповых хромшпинелидов во время формирования



Таблица 7. Состав Zn-содержащего хромшпинелида и замещающих его феррихромита и хроммагнетита (мас. %)

Table 7. Composition of Zn-containing chrome spinelide and its substitutes ferrichromite and chromium magnetite (wt. %)

Минерал / Mineral	№ ан.	FeO	ZnO	MnO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Σ
Хромшпинелид Chrome spinelide	1	19.28	16.50	1.77	30.66	22.77	9.36	0.49	100.83
	2	20.15	15.64	1.79	31.47	23.75	7.08	0.54	100.42
	3	20.06	15.65	1.94	31.60	23.56	7.56	0.50	100.87
	4	24.68	10.94	2.14	31.73	25.83	5.19	0.54	101.05
	5	25.96	9.53	2.15	32.27	25.83	4.68	0.55	100.97
	6	27.29	7.92	2.31	32.23	26.14	4.42	0.54	100.85
	7	30.22	4.31	2.44	33.06	25.97	3.41	0.57	99.98
	8	29.30	4.66	2.60	31.81	25.27	4.71	0.60	98.95
	9	22.09	12.95	2.01	31.09	24.08	6.52	0.53	99.27
Феррихромит Ferrichromite	10	25.25	3.91	2.93	27.65	2.58	37.29	0.0	99.61
	11	26.56	2.87	2.75	28.59	2.96	36.18	0.0	99.91
	12	26.46	3.31	2.60	25.86	2.57	39.96	0.0	100.76
	13	26.97	2.83	2.32	23.54	2.26	42.45	0.0	100.37
	14	27.59	3.24	1.84	24.20	3.50	40.90	0.0	101.27
Хроммагнетит Chrome magnetite	15	29.89	0.88	0.73	12.22	0.77	55.76	0.0	100.25
	16	29.36	1.11	0.88	12.82	1.07	54.26	0.0	99.50
	17	29.39	1.13	0.92	13.14	0.88	54.43	0.0	99.89
	18	30.14	0.74	0.62	11.32	0.70	56.84	0.0	100.36

Формулы минералов (O = 4) / Mineral formulas (O = 4)

1. $Fe^{2+}_{0.55}Zn_{0.41}Mn_{0.05}Al_{0.91}Cr_{0.83}Fe^{3+}_{0.24}Ti_{0.01}O_4$
2. $Fe^{2+}_{0.57}Zn_{0.39}Mn_{0.05}Al_{0.95}Cr_{0.85}Fe^{3+}_{0.18}Ti_{0.01}O_4$
3. $Fe^{2+}_{0.57}Zn_{0.39}Mn_{0.06}Al_{0.94}Cr_{0.84}Fe^{3+}_{0.19}Ti_{0.01}O_4$
4. $Fe^{2+}_{0.69}Zn_{0.27}Mn_{0.06}Al_{1.01}Cr_{0.83}Fe^{3+}_{0.15}Ti_{0.01}O_4$
5. $Fe^{2+}_{0.72}Zn_{0.23}Mn_{0.06}Al_{1.01}Cr_{0.85}Fe^{3+}_{0.12}Ti_{0.01}O_4$
6. $Fe^{2+}_{0.76}Zn_{0.19}Mn_{0.07}Al_{1.02}Cr_{0.84}Fe^{3+}_{0.11}Ti_{0.01}O_4$
7. $Fe^{2+}_{0.84}Zn_{0.10}Mn_{0.07}Al_{1.02}Cr_{0.87}Fe^{3+}_{0.09}Ti_{0.01}O_4$
8. $Fe^{2+}_{0.82}Zn_{0.12}Mn_{0.07}Al_{1.00}Cr_{0.85}Fe^{3+}_{0.12}Ti_{0.02}O_4$
9. $Fe^{2+}_{0.65}Zn_{0.32}Mn_{0.06}Al_{0.97}Cr_{0.84}Fe^{3+}_{0.17}Ti_{0.01}O_4$

10. $Fe^{2+}_{0.80}Zn_{0.11}Mn_{0.09}Fe^{3+}_{1.06}Cr_{0.83}Al_{0.11}O_4$
11. $Fe^{2+}_{0.83}Zn_{0.08}Mn_{0.09}Fe^{3+}_{1.02}Cr_{0.85}Al_{0.15}O_4$
12. $Fe^{2+}_{0.83}Zn_{0.09}Mn_{0.08}Fe^{3+}_{1.12}Cr_{0.77}Al_{0.11}O_4$
13. $Fe^{2+}_{0.85}Zn_{0.08}Mn_{0.07}Fe^{3+}_{1.20}Cr_{0.70}Al_{0.10}O_4$
14. $Fe^{2+}_{0.85}Zn_{0.09}Mn_{0.06}Fe^{3+}_{1.14}Cr_{0.71}Al_{0.15}O_4$
15. $Fe^{2+}_{0.95}Zn_{0.03}Mn_{0.02}Fe^{3+}_{1.60}Cr_{0.37}Al_{0.05}O_4$
16. $Fe^{2+}_{0.94}Zn_{0.03}Mn_{0.03}Fe^{3+}_{1.56}Cr_{0.39}Al_{0.05}O_4$
17. $Fe^{2+}_{0.94}Zn_{0.03}Mn_{0.03}Fe^{3+}_{1.56}Cr_{0.40}Al_{0.04}O_4$
18. $Fe^{2+}_{0.96}Zn_{0.02}Mn_{0.02}Fe^{3+}_{1.63}Cr_{0.34}Al_{0.03}O_4$

отложений алькесвожской свиты, как об этом можно судить по составу центральных частей зерен (рис. 11, а), был достаточно разнообразен, что связано с их поступлением из различных источников.

Взаимодействие хромшпинелидов с окружающими минералами при метаморфической перекристаллизации пород алькесвожской свиты проявляется повсеместно и заключается в замещении хромшпинелидов слюдой или магнетитом в зависимости от положения в разрезе. При замещении хромшпинелидов слюдой вокруг них образовались фукситовые оторочки с последующей фрагментацией зерен и, наконец, полным разложением. Мобилизованный хром фиксировался в фуксите, гематите, хлорите и новообразованном Zn-содержащем хромшпинелиде. В базальном горизонте алькесвожской свиты магнетит активно замещает зерна хромшпинелидов, в результате чего многие из них расчленены на отдельные фрагменты. В замещающем магнетите присутствует примесь Cr, некоторая его часть фиксировалась также в хлорите и мусковите. В замещаемом хромшпинелиде в ряде случаев наблюдаются закономерные изменения состава. Постепенно активное

замещение хромшпинелида магнетитом сменилось нарастанием внешних слоев магнетита, в которых Cr уже не обнаруживается. Магнетит, нарастающий на хромшпинелид и частично его замещающий, видимо, предохранял хромовый минерал от полного исчезновения.

Все детритовые хромшпинелиды, обнаруженные в породах алькесвожской свиты, имеют высокое содержание ZnO. Возникает закономерный вопрос о времени обогащения хромшпинелидов цинком: произошло ли оно в материнской ультраосновной породе или значительно позже — после денудации коренного источника, транспортировки зерен и преобразования кластогенных хромшпинелидов уже в осадочной породе.

В целом преобразования хромшпинелидов при метаморфизме гипербазитов и терригенных осадочных пород имеет сходный характер, что обусловлено общими причинами — неустойчивостью первично-магматических минералов в новых термодинамических условиях, в результате чего хромшпинелид взаимодействует с окружающей средой. Одним из следствий такого взаимодействия является обогащение хромшпинелидов цинком. Однако состав гипербази-

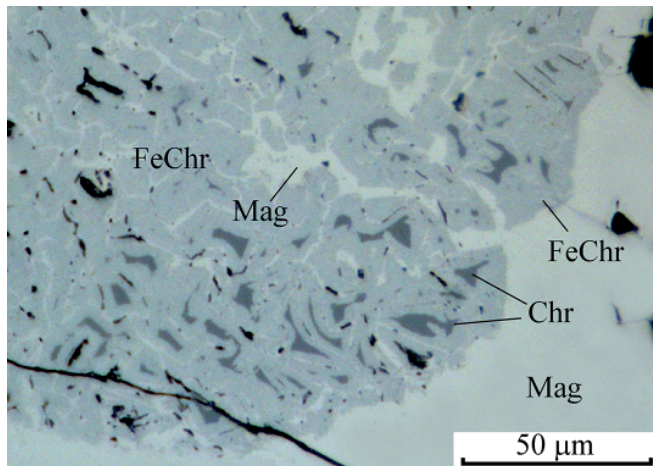


Рис. 10. Замещение глиноземистого хромшпинелида (Chr) феррихромитом (FeChr) и магнетитом (Mag). Реликты хромшпинелида содержат 17.0–17.5 мас. % ZnO. Изображение в отраженном свете. Зерно 205136_3

Fig. 10. Replacement of aluminous chrome spinel (Chr) by ferrichromite (FeChr) and magnetite (Mag). Chrome spinel relics contain 17.0–17.5 wt. % ZnO. Reflected light image. Grain 205136_3

тов и терригенных пород значительно отличается, в первую очередь высокими содержаниями щелочей в терригенных породах. Поэтому замещение хромшпинелидов фукситом, широко распространенное в метатерригенных породах, в метагипербазитах реализуется в незначительных масштабах. Из количественных соотношений между шпинелеобразующими компонентами (Fe, Mg и Zn) и между Zn и Cr обогащение вторичных хромшпинелидов цинком в метатерригенных породах более вероятно, чем в метагипербазитах (Онищенко, 2025).

Между тем достоверно связать замещение хромшпинелида фукситом, наблюдаемое в породах алькесвожской свиты, с одновременным обогащением остаточного хромшпинелида цинком не представляется возможным. В хромшпинелидах с однородным распределением элементов, замещаемых магнетитом, установить время обогащения цинком также затруднительно.

Ключевое значение имеют некоторые зерна, заключенные в магнетите, в которых изменения состава выражены более отчетливо и в которых можно определить не только характер изменений, но и относительное время их проявления. Во всех хромшпинелидах с неоднородным распределением цинка его наиболее высокие концентрации приурочены к фронту замещения магнетитом, что свидетельствует о взаимосвязи процесса замещения и привноса цинка.

Миграция цинка из внешней среды в хромшпинелид хорошо прослеживается в зернах с ярко выраженным зональным распределением ZnO (рис. 7), миграция облегчается наличием трещин (рис. 8). Первоначальная форма зерен хромшпинелидов сохранилась плохо, тем не менее округлая форма зерна на рис. 7, видимо, свидетельствует о его окатывании при транспортировке. А распределение цинка повторяет внешние (т. е. окатанные) контуры зерен хромшпинелида. Другими словами, хромшпинелид обогатился цинком в осадочной породе.

Замещение магнетитом глиноземистых хромшпинелидов сопровождается широким развитием кайём и прожилков феррихромит-хроммагнетитового состава, причем повышение содержания Zn в хромшпинелиде контролируется фронтом замещения. Наличие калиевой слюды в феррихромит-хроммагнетитовых прожилках (рис. 9) свидетельствует о совместной миграции калия и цинка из алюмосиликатной части породы с фиксацией калия в слюде, а цинка — в прилегающей части хромшпинелида. Наряду с привносом цинка из внешней среды есть признаки перераспределения этого элемента в процессе продвижения фронта замещения. Именно так можно объяснить исключительно высокие содержания цинка (до 17.5 мас. %) ZnO в реликтах хромшпинелида среди феррихромита (рис. 10).

Выше было показано, что обогащение хромшпинелида цинком связано в первую очередь с выносом двухвалентного железа и магния (рис. 7, с). Представляет интерес поведение трехвалентных элементов в этом процессе, который в наиболее полном виде проявлен в зернах глиноземистых хромшпинелидов. В химическом отношении замещение хромшпинелида феррихромитом и далее хроммагнетитом и магнетитом заключается в последовательной замене Al_2O_3 на Fe_2O_3 (рис. 11, а, длинная горизонтальная стрелка), а затем (после исчерпания Al_2O_3) замене Cr_2O_3 на Fe_2O_3 . Менее очевидно процесс замены Al_2O_3 на Fe_2O_3 проявлен в некоторых зернах хромшпинелидов в группе с относительно равномерным распределением элементов, характер химических процессов в таких зернах отражен верхней короткой горизонтальной стрелкой (рис. 11, а). В зернах с ярко выраженным зональным распределением ZnO и, соответственно, FeO (рис. 7) увеличение содержания Fe_2O_3 также проявлено (табл. 5), но невелико в количественном отношении и почти не отражается на диаграмме Al–Cr– Fe^{3+} (рис. 11, а), за исключением одной точки в зерне 520602_1, характеризующей состав хромшпинелида на контакте с магнетитом.

Изменение содержания ZnO в хромшпинелиде закономерно связано с увеличением доли Fe^{3+} в его составе, точнее со степенью окисленности железа, которая выражается значением $Fe^{3+}/\Sigma Fe$. При увеличении $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ доля Zn среди двухвалентных катионов возрастает, достигает максимума, а затем резко снижается (рис. 11, б). Эволюция состава, показанная стрелками, полностью повторяет строение зерен хромшпинелидов от центра к периферии. Полный цикл замещений прослеживается только в зерне 206116_1 (рис. 9). В зернах глиноземистых хромшпинелидов уменьшение содержания Zn связано с появлением феррихромита. В не столь глиноземистых шпинелидах уменьшение содержания Zn на контакте с магнетитом также регистрируется, чаще всего во фрагментах хромшпинелида в магнетите, как, например, в зерне 205136_1 (рис. 5, б; рис. 11).

Хотя обогащение цинком детритовых хромшпинелидов при метаморфизме пород алькесвожской свиты удается доказать только для некоторой их части, скорее всего, этот процесс затронул все зерна хромшпинелидов. В этой связи можно указать, что специфические хромофильные свойства цинка реализуются в осадочной породе в первую очередь путем заме-

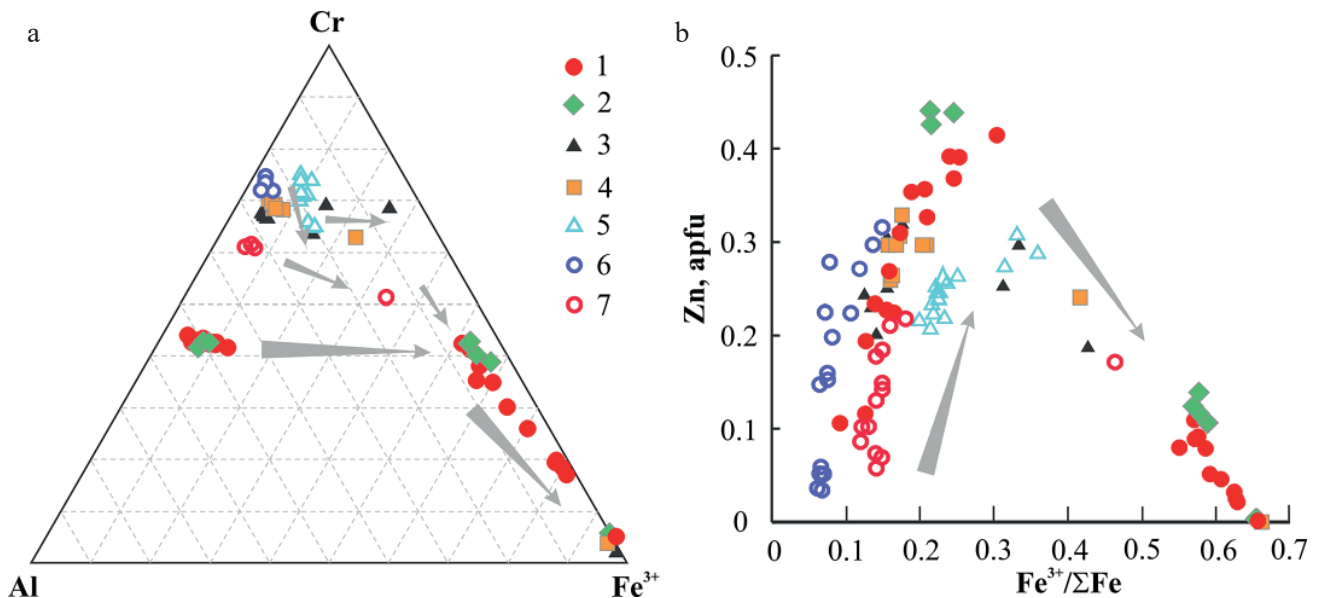


Рис. 11. Изменение состава хромшпинелидов при замещении магнетитом: а — изменение состава трехвалентных катионов; б — изменение содержания Zn в зависимости от степени окисления Fe. apfu — коэффициент в формуле минерала. Зерна: 1 — 206116_1 (рис. 9), 2 — 205136_3 (рис. 10), 3 — 205136_1 (рис. 5, б), 4 — 205136_2, 5 — 206116_3 (рис. 6), 6 — 206116_2 (рис. 8), 7 — 520602_1 (рис. 7)

Fig. 11. Change in the composition of chrome spinels when replaced by magnetite: a — change in the composition of trivalent cations; b — change in the Zn content depending on the oxidation state of Fe. Grains: 1 — 206116_1 (Fig. 9), 2 — 205136_3 (Fig. 10), 3 — 205136_1 (Fig. 5b), 4 — 205136_2, 5 — 206116_3 (Fig. 6), 6 — 206116_2 (Fig. 8), 7 — 520602_1 (Fig. 7)

щения детритовых хромшпинелидов, но в некоторых случаях в матрице фуксита отмечено образование идиоморфных кристалликов Zn-содержащего (14.4–18.1 мас. % ZnO) хромшпинелида (рис. 4, с; табл. 5). Следует отметить, что в золотоносных фукситовых прожилках в риолитах (месторождение Чудное) в этих же условиях метаморфизма также происходил синтез мелких идиоморфных кристаллов цинкохромита (Онищенко, 2025).

Необходимо также остановиться на роли гематита в процессах преобразования хромшпинелидов в породах алькесвожской свиты. Метаморфогенный магнетит развивается по детритовым зернам хромшпинелида, используя их как затравку. С другой стороны, сам магнетит подвергается частичному замещению гематитом. Чаще всего гематит присутствует в магнетите в виде пластинок по трещинам отдельности, но в некоторых случаях он развивается по магнетиту на границе с хромшпинелидом, усложняя картину взаимоотношений между этими минералами (рис. 6 и 8). Между тем, если сравнить рис. 8, где вокруг хромшпинелида есть гематитовое кольцо, с рис. 7, где гематит отсутствует, становится очевидным, что образование гематита не повлияло заметным образом на распределение элементов в хромшпинелиде. В то же время изменение состава хромшпинелида 206116_3 (рис. 6), который пронизан прожилками гематита, отличается от направления эволюции состава в других зернах отчетливой заменой Cr_2O_3 на Fe_2O_3 (рис. 11, а), что, в принципе, можно объяснить окислительной обстановкой, связанной с образованием гематита. Впрочем, на диаграмме (рис. 11, б) изменение состава этого зерна, хотя и обладает индивидуальными особенностями, но вписывается в общий тренд. Таким образом, в целом замещение магнетита гематитом не привело к значительному изменению состава хромшпинелидов.

Метаморфизм пород сопровождается их перекристаллизацией с образованием бластовых структур и сланцеватых текстур. Химические элементы, входящие в состав минералов, получают возможность мигрировать и слагать новые минералы. К новообразованным минералам в породах алькесвожской свиты относятся пирофиллит и хлоритид, приуроченные к прослоям, обогащенным глиноземом. К числу новообразований относятся также Zn-содержащие хромшпинелиды — как замещающие первичные детритовые хромшпинелиды, так и синтезированные в Cr-содержащем субстрате. Цинк, необходимый для этого, поступает в поровый раствор при перекристаллизации, скорее всего, глинистых минералов. Помимо хромшпинелидов, значительным трансформациям подвергся еще один детритовый минерал, а именно ильменит, представленный главным образом апоильменитовым лейкоксеном, перекристаллизация которого приводит к образованию скоплений зерен рутила и гематита.

Заключение

Преобразования детритовых хромшпинелидов при метаморфизме нижнепалеозойских пород алькесвожской свиты на Приполярном Урале в зависимости от положения их в разрезе происходили по двум сценариям. В первом из них хромшпинелиды замещались Cr-содержащим мусковитом (фукситом), во втором — магнетитом.

При замещении хромшпинелидов слюдой вокруг них образовались фукситовые оторочки с последующей фрагментацией зерен и, наконец, полным разложением. Мобилизованный хром фиксировался в метаморфогенных фуксите, гематите, хлорите, иногда в новообразованном Zn-содержащем хромшпинелиде.



В некоторых случаях пути миграции Cr совпадали с направлениями перемещения золотоносных растворов, что приводило к образованию сростаний самородного золота с Cr-содержащими минералами.

Метаморфогенный магнетит развивается по детритовым зернам хромшпинелида, используя их как затравку. В замещающем магнетите присутствует смесь хрома, некоторая часть хрома фиксировалась также в хлорите и мусковите. Активное замещение хромшпинелида магнетитом сменилось нарастанием внешних слоев магнетита, в которых Cr уже не обнаруживается, происходила консервация реликтов хромшпинелидов в магнетите.

Состав всех зерен хромшпинелидов является вторичным, в них практически нет магния, характерного элемента, присущего первичным магматогенным хромшпинелидам. Остаточные содержания MgO (до 1.8 мас. %) сохранились только в центральных частях некоторых зерен.

Все реликты хромшпинелидов в породах алькесвожской свиты характеризуются специфическим составом — они являются Zn-содержащими. Концентрация ZnO в зернах с относительно однородным распределением компонентов заключена в интервалах от 3.4–8.8 до 9.8–12.4 мас. %, диапазон содержаний ZnO в зернах зонального строения и зернах глиноземистого состава значительно больше (1.3–11.7 мас. % и 4.3–16.5 мас. %). Максимальное отмеченное нами содержание ZnO составляет 17.5 мас. %, а, учитывая литературные данные (Макеев и др., 1999), содержание ZnO в детритовых хромшпинелидах алькесвожской свиты достигает 27.4 мас. %.

Вполне вероятно, что обогащение всех зерен хромшпинелидов цинком произошло непосредственно при метаморфизме пород алькесвожской свиты, но доказать это оказалось возможным только для зерен с неоднородным распределением цинка. В хромшпинелидах наиболее высокие концентрации цинка контролируются фронтом замещения метаморфогенным магнетитом, что свидетельствует о взаимосвязи процесса замещения и привноса цинка. В наглядной форме это проявляется при замещении магнетитом глиноземистых хромшпинелидов, которое сопровождается широким развитием прожилков слюдисто-феррихромит-хроммагнетитового состава. Наличие калиевой слюды в этих прожилках свидетельствует о совместной миграции калия и цинка из алюмосиликатной части породы с фиксацией калия в слюде, а цинка — в прилегающей части хромшпинелида. Наряду с привносом цинка из внешней среды есть признаки перераспределения этого элемента в процессе продвижения фронта замещения, что приводит к весьма значительному повышению содержания цинка в реликтах хромшпинелида среди феррихромита.

В целом можно констатировать, что детритовые хромшпинелиды в породах алькесвожской свиты подверглись глубоким преобразованиям и замещению вплоть до полного исчезновения. Характерной геохимической меткой преобразованных хромшпинелидов является значительное содержание цинка, которое обусловлено перераспределением элементов при метаморфизме осадочной породы. Об исключительной способности цинка концентрироваться в шпинелидах свидетельствует не только замещение детритовых

хромшпинелидов Zn-содержащими разностями, но и локально проявленные явления синтеза Zn-содержащих хромшпинелидов в Cr-содержащем субстрате (фуксите).

Таким образом, наиболее вероятно, что обогащение всех зерен детритовых хромшпинелидов цинком произошло непосредственно в породах алькесвожской свиты при метаморфизме в условиях зеленосланцевой фации. Вместе с тем нельзя исключать вероятность того, что некоторая часть зерен была предварительно обогащена цинком еще при трансформации хромшпинелидов в материнской ультраосновной породе.

Исследование проведено в рамках темы «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий». Рег. № НИОКТР — 122040600009-2.

Литература / References

- Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка. (Ред. М. А. Шишкин) М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013, 252 с.
- State Geological Map of the Russian Federation. Scale of 1:200,000. North Urals Series. Sheet Q-41-XXV. Explanatory letter (Ed. M. A. Shishkin). Moscow: MF VSEGEI, 2013. 252 p. Russian.
- Ефанова Л. И., Повонская Н. В. Минералогические особенности и золотоносность базальной части разреза уралид хребта Малдынырд (Приполярный Урал) // Сыктывкарский минералогический сборник № 28. Сыктывкар, 1999. С. 155–164 (Тр. Ин-та геологии Коми науч. Центра УрО РАН; вып. 101).
- Efanova L. I., Povonskaya N. V. Mineralogical features and gold content of the basal part of the Uralides section of the Maldynyrd ridge (Subpolar Urals). Syktyvkar mineralogical collection, No. 28. (Proc. Institute of Geology, Komi Sci. Center, UB RAS. vol. 101), p. 155–164. Russian.
- Ефанова Л. И., Повонская Н. В., Швецова И. В. Золотоносность и типоморфные особенности минералов алькесвожской толщи на участке Нестеровский // Геология Европейского Севера России. Сб. 4. Сыктывкар, 1999. С. 102–125 (Труды ин-та геологии Коми ЦНЦ УрО РАН; вып. 103)
- Efanova L. I., Povonskaya N. V., Shvetsova I. V. Gold-bearing and typomorphic features of minerals of the Alkesvozh formation at the Nesterovsky site. Geology of the European North of Russia. Collection 4. Syktyvkar; 1999. p. 102–125 (Proceedings of the Institute of geology Komi SC UB RAS: is. 103). Russian.
- Ефанова Л. И., Юдович Я. Э. Бонанцевые руды золота на месторождении Нестеровское // Геохимия древних толщ севера Урала. Сыктывкар: Геопринт, 2002. С. 285–292.
- Efanova L. I., Yudovich Ya. E. Bonanza gold ores at the Nesterovskoye deposit. In: Geochemistry of Ancient Strata of the North Urals. Syktyvkar: Geoprint; 2002. p. 285–292. Russian.
- Киселева О. Н., Белянин Д. К., Айриянц Е. В., Жмодик С. М., Куликов Ю. И., Роцектаев П. А. Природа цинковых хромитов из полосчатых ильменит-гематитовых кварцевых песчаников безымянной толщи Тувино-



- Монгольского террейна (юго-восточная часть Восточного Саяна, Россия) // *Geodynamics & Tectonophysics*, 2025, V. 16, Issue 4. doi:10.5800/GT-2025-16-4-0834
- Kiseleva O. N., Belyanin D. K., Airiyants E. V., Zhmodik S. M., Kulikov Yu. I., Roshchektaev P. A. The Nature of Zinc Chromites from Banded Ilmenite-Hematite Quartz Sandstone of the Bezmyannaya Formation of the Tuva-Mongolian Terrane (Southeastern Part of the East Sayan, Russia). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2025;16(4):0834. Russian.
- Макеев А. Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. СПб.: Наука, 1992. 197 с.
- Makeev A. B. Mineralogy of Alpine-type Ultrabasites of the Urals. St. Petersburg: Nauka; 1992. 197 p. Russian.
- Макеев А. Б., Ефанова Л. И., Филиппов В. Н. Манганоцинкохромит и манганоцинкоалюмохромит Приполярного Урала // Сыктывкарский минералогический сборник № 28. Сыктывкар. 1999. С. 165–171. (Тр. Ин-та геологии Коми науч. Центра УрО РАН; вып. 101).
- Makeev A. B., Efanova L. I., Filippov V. N. Mangan-Zn-chromite and mangan-Zn-Al-chromite of the Polar Urals. Syktvykar mineralogical collection, No. 28. 1999. (Proc. Institute of geology Komi SC UB RAS; vol. 101). p. 165–171. Russian.
- Макеев А. Б., Макеев Б. А. Цинковые хромшпинелиды среднего Тимана и Приполярного Урала // Доклады Российской АН. 2005. Т. 404, № 2. С. 235–240.
- Makeev A. B., Makeev B. A. Zn-Chromspinel of Middle Timan and Near-Polar Urals. *Doklady Earth Sciences*. 2005;404(7):1078-1083.
- Мурзин В. В., Варламов Д. А., Замятина Д. А. Эпигенетические преобразования хромшпинелида в процессе родингитизации и нефритизации на Агардагском проявлении золота (Южная Тува) // Тр. ИГТ УрО РАН. 2017. Вып. 164. С. 227–231.
- Murzin V. V., Varlamov D. A., Zamyatina D. A. Epigenetic transformations of chromspinelide in the process of rodingitization and nephritization at the Agardag gold deposit (South Tuva). *Proc. IGG UB RAS*. 2017;164:227-231. Russian.
- Нестеров А. Р., Румянцева Е. В. Цинкохромит $ZnCr_2O_4$ — новый минерал из Карелии // Зап. ВМО. 1987. Т. 116. № 3. С. 367–371.
- Nesterov A. R., Rumyantseva Y. V. Zincochromite, $ZnCr_2O_4$ — a new mineral from Karelia. *Zapiski VMO*. 1987; 116(3): 367–371. Russian.
- Никулова Н. Ю., Макеев Б. А., Филиппов В. Н., Витязев П. Г. Хромит из песчаников манитаньрдской серии хр. Енганепэ (Полярный Урал) // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2018): Материалы минералогического семинара с международным участием. 2018. С. 47–49.
- Nikulova N. Yu., Makeev B. A., Filippov V. N., Vityazev P. G. Chromite from sandstones of the Manitanryrd series of the Enganepe ridge (Polar Urals). In the collection: Modern problems of theoretical, experimental and applied mineralogy (Yushkin readings — 2018). Proceedings of the mineralogical seminar with international participation; 2018. p. 47–49. Russian.
- Никулова Н. Ю., Филиппов В. Н., Швецова И. В. Возможные источники рудных минералов в нижнепалеозойских псефитах в верховье реки Малая Кара (Полярный Урал) // Региональная геология и металлогения. 2014. № 57. С. 80–86.
- Nikulova N. Yu., Filippov V. N., Shvetsova I. V. Possible sources of ore minerals in Lower Paleozoic psephytes in the headwaters of the Malaya Kara River (Polar Urals). *Regional. Geol. Metallogen*. 2014;57:80–86. Russian.
- Новоселов К. А., Белогуб Е. В., Блинов И. А., Артемьев Д. А. Детритовые хромшпинелиды Удоканского осадочного бассейна (Забайкалье) // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 5. С. 694–709. doi: 10.15372/GiG2023173
- Novoselov K. A., Belogub E. V., Blinov I. A., Artemyev D. A. Detrital chrome spinels of the Udokan sedimentary basin in Transbaikalia. *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(5):609–522. DOI:10.2113/RGG20234632
- Озеров В. С. Метаморфизованные россыпи золота Приполярного Урала // Руды и металлы. 1996. № 4. С. 28–37.
- Ozerov V. S. Metamorphosed gold placers of the Subpolar Urals. *Rudy i Metally*. 1996;4:28–37. Russian.
- Онищенко С. А. Цинкохромит в золотофукситовых прожилках на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал): генетический аспект // Литосфера. 2025. Т. 25. № 6. С. 1384–1403. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2025-25-6-1384-1403>
- Onishchenko S. A. Zincochromite in gold-fuchsite veins at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals): Genetic aspects. *Lithosphere (Russia)*. 2025;25(6):1384–1403. Russian.
- Онищенко С. А., Соболева А. А. Апогипербазитовые метасоматиты поднятия Енганепэ (Полярный Урал) // Вестник геонаук. 2021. № 3. С. 11–20. DOI: 10.19110/geov.2021.3.2
- Onishchenko S. A., Soboleva A. A. Apoultramafic metasomatites of the Enganepe Uplift (the Polar Urals). *Vestnik of Geosciences*. 2021;3:11–20. Russian.
- Павлова А. А. Цинковые хромшпинелиды в осадочно-терригенных породах участка Палеодолинный северо-восточного контакта гранитного массива Мань-Хамбо (Приполярный Урал) // Разведка и охрана недр. 2011. № 1. С. 25–28.
- Pavlova A. A. Zinc chrome spinelides in sedimentary-terrirogenous rocks of the Paleodoliny site of the north-eastern contact of the Man-Hambo granite massif (Subpolar Urals). *Exploration and protection of mineral resources*. 2011;1:25–28. Russian.
- Пыстин А. М., Гракова О. В., Пыстина Ю. И., Кушманова Е. В., Попвасев К. С., Потанов И. Л., Хубанов В. Б. U-Pb (LA-SF-ICP-MS)-возраст и вероятные источники сноса детритовых цирконов из терригенных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала // Литосфера. 2022. Т. 22. № 6. С. 741–760. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-760>
- Pystin A. M., Grakova O. V., Pystina Yu. I., Kushmanova E. V., Popvasev K. S., Potapov I. L., Khubanov V. B. U-Pb (LA-SF-ICP-MS) dating and probable provenance of detrital zircons from terrigenous deposits of the Upper Precambrian of the Subpolar Urals. *Lithosphere (Russia)*. 2022;22(6):741–760. Russian.
- Резницкий Л. З., Скляр Е. В., Бараш И. Г. Ванадиево-хромовые метаморфические шпинели (слюдянский комплекс, Южное Прибайкалье). Железистые шпинели // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. №. 4. С. 494–515. doi:10.15372/GiG2022118
- Reznitsky L. Z., Sklyarov E. V., Barash I. G. Metamorphic vanadium-chromium spinel (Sludyanka Complex, South



- Baikal area). Ferroan spinel. *Russian Geology and Geophysics*. 2023;64(4):407–423. DOI:10.2113/RGG20224473
- Силаев В. И., Голубева И. И., Хазов А. Ф., Тихомирова В. Д., Филиппов В. Н., Кузнецов Н. В., Белоусова Е. А. Цинксо-держащие и цинкистые хромшпинелиды: химизм и типоморфное значение // Труды ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2010. Вып. 126. С. 110–180.
- Silaev V. I., Golubeva I. I., Khazov A. F., Tikhomirova V. D., Filippov V. N., Kuznetsov N. V., Belousova E. A. Zinc-containing chrome spinelides: chemistry and typomorphic significance. *Proc. IG Komi SC UB RAS*. 2010;126:110–180. Russian.
- Спиридонов Э. М., Сидорова Н. В., Нурмухаметов Ф. М., Коротаева Н. Н., Куликова И. М., Поленов Ю. А., Трошкина А. Н. Листвениноподобные апопикритовые флогопит-магнезитовые гумбеиты Березовского месторождения золота с цирконом, монацитом, ксенотимом, фторапатитом, турмалином, реликтовым цинкохромитом // Уральский геол. журнал. 2014. Т. 97. № 1. С. 20–67.
- Spiridonov E. M., Sidorova N. V., Nurmuchametov F. M., Korotaeva N. N., Kulikova I. M., Polenov Y. A., Troshkina A. N. Listvenite-like apopicitic phlogopite-magnesite gumbaites of the Beresovskoe gold deposit with zircon, monazite, xenotime, fluorapatite, tourmaline, relic zinc-chromite. *Urals geol. J.* 2014;97(1):20–67. Russian.
- Юдович Я. Э., Ефанова Л. И., Швецова И. В., Козырева И. В., Котельникова Е. А. Зона межформационного контакта в каре оз. Грубепендиты. Сыктывкар: Геопринт, 1998. 96 с.
- Yudovich Ya. E., Efanova L. I., Shvetsova I. V., Kozyreva I. V., Kotelnikova E. A. The Zone of Interformational Contact in the Glacier Lake Grubependity. Syktyvkar: Geoprint; 1998. 96 p. Russian.
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Иванова Т. И., Швецова И. В. Геохимия и минералогия хрома в осадочных толщах севера Урала. Сыктывкар: Пролог, 1997. 76 с.
- Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Ivanova T. I., Shvetsova I. V. Chromium Geochemistry and Mineralogy in the Sedimentary Strata of the Northern Urals. Syktyvkar: Prolog; 1997. 76 p. Russian.
- Barnes S. J. Chromite in komatiites, II. Modification during greenschist to mid-amphibolite facies metamorphism. *J. Petrol.* 2000;41(3):387–409. <http://www.per.dem.csiro.au/staff/BarnesSteve/>
- Bjerg E. A., de Brodtkorb M. K., Stumpfl E. F. Compositional zoning in Zn-chromites from the Cordillera Frontal Range, Argentina. *Miner. Mag.* 1993;57(386):131–139.
- Challis G. A., Grapes R., Palmer K. Chromian muscovite, uvarovite, and zincian chromite: products of regional metasomatism in Northwest Nelson, New Zealand. *Can. Miner.* 1995; 33(6):1263–1284.
- Fanlo I., Gervilla F., Colas V., Subias I. Zn-, Mn- and Co-rich chromian spinels from the Bou-Azzer mining district (Morocco): Constraints on their relationship with the mineralizing process. *Ore Geology Reviews*. 2015;71:82–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.05.006>
- Gahlan H. A., Arai S. Genesis of peculiarly zoned Co, Zn and Mn-rich chromian spinel in serpentinite of Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco. *J. Miner. Petrol. Sci.* 2007;102:69–85. doi:10.2465/jmps.060212
- Liipo J. P., Vuollo J. I., Nykänen V. M., Piirainen T. A. Zoned Zn-rich chromite from the Näätäniemi serpentinite massif, Kuhmo greenstone belt, Finland. *Canad. Miner.* 1995; 33(3):537–545.
- Pal D., Sarkar B. Ch., Ghosh S., Sen R., Jana A., Mukhopadhyay S., Sinha D. Geochemistry of detrital zinc-rich chromite in conglomerates from eastern India. *Mineral. Mag.* 2022;86(2):214–221. doi: 10.1180/mgm.2022.12.
- Staddon L. G., Parkinson I. J., Cavosie A. J., Elliott T., Valley J. W., Fournelle J., Kemp A., Shirey S. B. Detrital chromite from Jack Hills, Western Australia: signatures of metamorphism and constraints on provenance. *J. Petrol.* 2021;62(12):1–30. doi: 10.1093/petrology/egab052.
- Svetov S. A., Chazhengina S. I., Singh V. K., Rybnikova Z. P., Mishra S. Accessory zoned chromite from archean komatiites of the Karelian craton, Russia: metamorphic fingerprints. *Zapiski RMO*. 2019;4:80–94. DOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.06>
- Treloar P. J. The Cr-minerals of Outokumpu — their chemistry and significance. *J. Petrol.* 1987;28(5):867–886.
- Von Knorring O., Condliffe E., Tong Y. L. Some mineralogical and geochemical aspects of chromiumbearing skarn minerals from northern Karelia, Finland. *Bull. Geol. Soc. Finl.* 1986;58(1):277–292.
- Weiser Th. W., Hirdes W. Zinc-rich chromite from Paleoproterozoic conglomerates at Tarkwa gold mine, Ghana. *Canad. Miner.* 1997;35(3):587–595.
- Wylie A. G., Candela P. A., Burke T. M. Compositional zoning in unusual Zn-rich chromite from the Sykesville district of Maryland and its bearing on the origin of "ferritchromit". *Am. Miner.* 1987;72(3–4):413–422.

Поступила в редакцию / Received 09.02.2026